

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **REDES DE SENSORES PARA IoT ESTUDIO DEL PROTOCOLO 802.15.4e**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES**

**HENRY FABIAN TIBANLOMBO POAQUIZA**

**henry.tibanlombo@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: CARLOS ROBERTO EGAS ACOSTA**

**carlos.egas@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Henry Fabian Tibanlombo Poaquiza declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Henry Fabian Tibanlombo Poaquiza**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Henry Fabian Tibanlombo Poaquiza, bajo mi supervisión.

---

**MSc. Carlos Roberto Egas Acosta**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

---

Henry Fabian Tibanlombo Poaquiza

---

MSc. Carlos Roberto Egas Acosta

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia, mis padres Carmen Poaquiza y Luis Tibanlombo por su guía y su apoyo, a mis hermanos Nancy, Jessica, Erica y Alex que siempre han confiado y han tenido fe en mí a pesar de todos mis tropiezos, a mi sobrinito Emilio que se ha convertido en la luz de mis días y a mis amigos que nunca han dejado de creer en mí.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia, a mis amigos que han sido un pilar durante la etapa universitaria, de la misma forma agradezco a mis profesores por impartirme los conocimientos que me acompañaran toda mi vida.

Le agradezco a mi tutor Ing. Carlos Egas por darme la oportunidad de realizar este trabajo de titulación y por la paciencia que siempre lo ha caracterizado hacia sus estudiantes.

Por último, agradezco a todas las personas con las que he tratado, porque he aprendido de todas las experiencias que hemos pasado juntos, lo que ha contribuido a mi formación personal y sentimental.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	1
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Protocolo 802.15.4.....	2
1.4.2 Protocolo 802.15.4e.....	9
2 METODOLOGÍA .....	35
2.1 Diferencias entre protocolos 802.15.4 y 802.15.4e .....	36
2.1.1 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo TSCH .....	36
2.1.2 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo DSME .....	37
2.1.3 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo LLDN .....	39
2.1.4 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo AMCA.....	39
2.1.5 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo BLINK .....	40
2.2 Comparación de características de protocolo 802.15.4e .....	41
2.3 Kits de desarrollo de redes 802.15.4e.....	43
2.4 Herramientas de simulación de redes 802.15.4e .....	45
3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
3.1 Conclusiones.....	48
3.2 Recomendaciones.....	50
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS .....	55



## **RESUMEN**

El presente Proyecto pretende realizar un estudio del protocolo 802.15.4e, así como una comparación con el protocolo anterior 802.15.4, se pone especial énfasis en la capa de control de acceso al medio, para luego realizar una comparación que se mostrará en una tabla.

En el estudio se abordan conceptos referentes a IoT, métodos de acceso al medio, tipos de codificación, mecanismos de handshaking, mejoras en tipos de tramas y aumento en el número de campos de control de las mismas. Utilizando estos conocimientos se realiza un análisis comparativo con el propósito de facilitar el entendimiento y aplicación del protocolo en estudio, además se analizan simuladores y sus distintas herramientas, así como kits de desarrollo que nos permiten adentrarnos más en la utilización de este protocolo.

**PALABRAS CLAVE:** IoT, handshaking.

## **ABSTRACT**

The present project intends to carry out a study of the 802.15.4e protocol, as well as a comparison with the previous protocol 802.15.4, special emphasis is placed on the layer of access control to the medium, and then a comparison will be made that will be shown in a table.

The study addresses concepts related to IoT, methods of access to the medium, types of coding, handshaking mechanisms, improvements in types of frames and an increase in the number of control fields of the same. Using this knowledge, a comparative analysis is carried out with the purpose of facilitating the understanding and application of the protocol under study, in addition, simulators and their different tools are analyzed, as well as development kits that allow us to delve deeper into the use of this protocol.

**KEYWORDS:** IoT, handshaking.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Las redes de sensores se han convertido en un pilar importante en la implementación de IoT tanto a nivel industrial como doméstico. El protocolo 802.15.4e que es una mejora de su antecesor aprobado en 2006 ha tenido gran aceptación en diferentes campos como: investigación, industrias y desarrollo de IoT, la razón de su relativo éxito en los últimos años se debe a que el protocolo 802.15.4e posee varias modificaciones de la capa de acceso al medio a través de las cuales se incrementa la cantidad de aplicaciones.

Considerando que la industria 4.0 ya es una realidad, se hacen necesarias varias propuestas que den abasto a la demanda de IoT, una de ellas y que más aceptación ha tenido es el protocolo 802.15.4e, motivo por el cual en este estudio se propone analizar las características más importantes, la utilidad del mismo en la actualidad y herramientas de simulación y plataformas de desarrollo que son de utilidad en el momento de implementación.

## 1.1 Objetivo general

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Estudiar el protocolo 802.15.4e, sus aplicaciones relacionadas con IoT, simuladores y kits de desarrollo.

## 1.2 Objetivos específicos

- Estudiar características de los protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.4e.
- Establecer diferencias entre los protocolos en la capa MAC.
- Estudiar características a nivel MAC del IEEE 802.15.4e.
- Analizar herramientas de simulación y kits de desarrollo de 802.15.4e

## 1.3 Alcance

El desarrollo de este componente pretende mostrar las diferencias entre los protocolos 802.15.4 y 802.15.4e mediante el estudio y posterior análisis de cada uno. El análisis comparativo en especial de la capa de acceso que poseen grandes diferencias en sus métodos, nos permitirá apreciar de forma más clara las mejoras implementadas por el TG4e. Además, se estudiará herramientas de simulación y kits de desarrollo que nos

facilitará el entender su funcionamiento y las aplicaciones del protocolo en cuestión.

La metodología a utilizar es la cuantitativa que se utiliza en gran porcentaje en proyectos de Tesis, entre sus principales características son: estática y rígida, diseñada para probar hipótesis, recolección de información en un contexto científico, esta recolección permite probar hipótesis y elaborar conclusiones. Esta revisión bibliográfica sobre el protocolo 802.15.4e permitirá identificar lo que ya es conocido, lo que en otras investigaciones se ha intentado encontrar, así como los métodos que se utilizaron y las dificultades que se presentaron para luego centrarse en los aspectos que deben ser estudiados más a fondo. Por lo tanto, las fases implementadas del presente componente son:

- Fase de planteamiento.

Se realizará un análisis de las principales características del protocolo 802.15.4 y del protocolo 802.145.4e, en el análisis de los modos de operación de 802.15.4e se elaborará una breve descripción que incluirá el tipo de redes y las aplicaciones a las cuales va orientado cada modo.

- Fase de implementación.

Se realizará un análisis a fondo de la capa de acceso del protocolo 802.15.4e y se realizará una comparación con la capa de acceso del protocolo 802.15.4, los resultados de la comparación se presentarán en un cuadro. Además, se analizarán simuladores y kits de desarrollo de dicha tecnología.

- Fase de evaluación y análisis de resultados.

Se realizará un análisis de las características del protocolo 802.15.4e y sus posibles aplicaciones en el ámbito IoT.

Finalmente, se realizarán conclusiones y recomendaciones las cuales se enfocarán en posibles usos y como desarrollar o mejorar el estudio realizado.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Protocolo 802.15.4**

El estándar IEEE 802.15.4 está principalmente diseñado para redes LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network) debido a que el volumen de datos que suelen generar los dispositivos en una red de sensores es muy bajo y sus transmisiones son poco frecuentes en comparación con otras redes por ejemplo redes con tecnología IEEE 802.11 [1], como consecuencia el objetivo principal de este estándar es lograr bajo consumo de potencia ya que algunos de los dispositivos que usan esta tecnología se alimentan con una batería o mediante otras fuentes de energía limitadas [2] [3], se hace necesario un bajo consumo para garantizar un largo tiempo de vida del nodo.

## **Tipos de nodos**

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de nodos: dispositivo de funciones completas (Full Function Device - FFD) y dispositivos de funciones reducidas (Reduced Function Device - RFD) [4].

### **Dispositivo de funciones completas**

Son dispositivos que pueden desempeñar todos los roles que define el estándar, los roles son tres: dispositivo final (device), coordinadores de otros nodos de menor capacidad (coordinator) y coordinadores de toda una red PAN (PAN coordinator - PANC) [5].

### **Dispositivo de funciones reducidas**

Son dispositivos de menor capacidad a nivel de hardware y software, en una red solo pueden actuar como dispositivos finales.

## **Topologías**

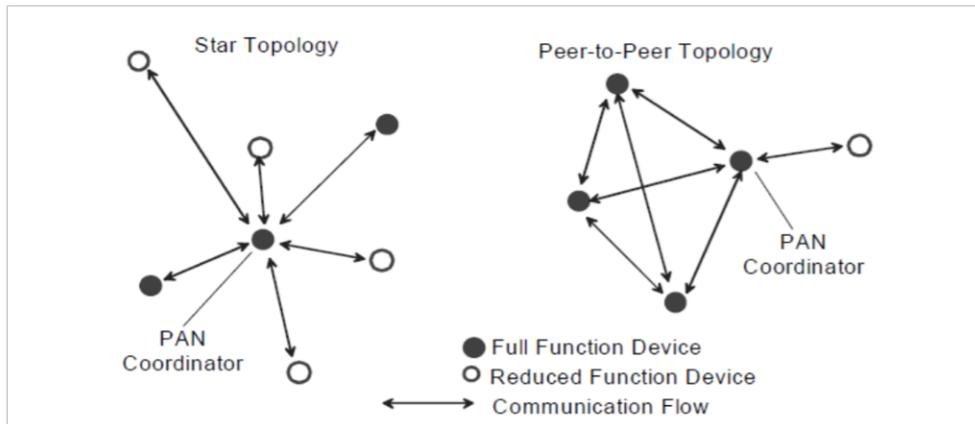
El Estándar define dos topologías de red: topología estrella y topología peer-to-peer [6].

### **Topología estrella**

Está formada por un dispositivo FFD que actúa como coordinador de todos los dispositivos de la red [7]. La comunicación entre los dispositivos es directa desde el nodo coordinador de la red hacia el dispositivo final y viceversa, en cuanto a la alimentación el PANC está conectado a la red eléctrica puesto que permanece activo todo el tiempo, en cambio los dispositivos finales están alimentados por baterías ya que transmiten información pocas veces y por lapsos cortos de tiempo.

### **Topología peer-to-peer**

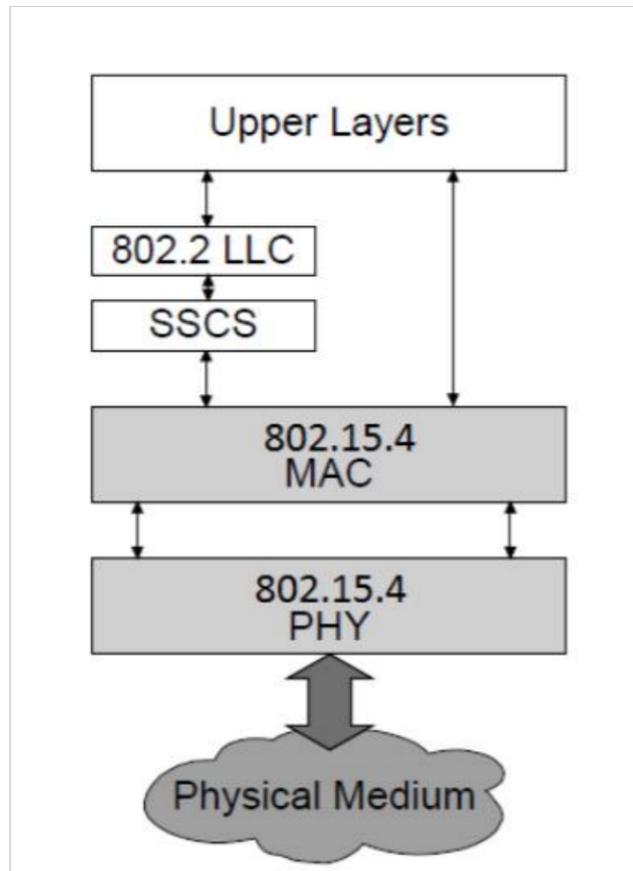
En este caso también existe un PANC, pero puede existir comunicación entre dispositivos finales, no necesariamente deben estar conectados al PANC, para formar este tipo de red se necesita un protocolo de encaminamiento ya que las comunicaciones pueden requerir más de un salto para llegar a su destino. Este tipo de topologías permite formar redes complejas como por ejemplo Redes Mesh [3].



**Figura 1.1.** Topologías Estrella y Peer-to-peer [1]

#### Arquitectura IEEE 802.15.4

El protocolo IEEE 802.15.4 define dos capas: física y MAC, pero existen otras capas encima conocidas como capas de adaptación y están basadas en el protocolo 802.2, de igual forma son dos: Subcapa de convergencia específica del servicio (Service Specific Convergence Sublayer - SSCS) y Control de enlace lógico (Logical Link Control - LLC). Un aspecto importante de la arquitectura es que las siguientes capas superiores pueden acceder directamente a los servicios de la capa MAC.



**Figura 1.2.** Arquitectura del protocolo IEEE 802.15.4 [1]

### Capa Física

Existen dos versiones para la capa física, a continuación, se muestran las características de cada una.

#### Características de versión 2003

Tres bandas de frecuencia: 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz

Técnica de ensanchamiento es DSSS

Dos modulaciones BPSK y O-QPSK

**Tabla 1.1.** Capa física versión 2003 [8]

<b>Banda</b>	<b>Numero de canales</b>	<b>Técnica de ensanchado</b>	<b>Modulación</b>	<b>Tasa de símbolo (kbaud)</b>	<b>Tasa de bit (kbps)</b>
868 MHz	1	Binary DSSS	BPSK	20	20
915 MHz	10	Binary DSSS	BPSK	40	40
2.4 GHz	16	Binary DSSS	O-QPSK	62.5	250

#### Características de versión 2006

Dos bandas de frecuencia: 868 MHz y 915 MHz.

Dos técnicas de ensanchamiento: PSSH y DSSS.

Dos técnicas de modulación: ASK y O-QPSK

**Tabla1.2.** Capa física versión 2006 [9]

<b>Banda</b>	<b>Numero de canales</b>	<b>Técnica de ensanchado</b>	<b>Modulación</b>	<b>Tasa de símbolo (kbaud)</b>	<b>Tasa de bit (kbps)</b>
868 MHz	1	20 bit PSSH	ASK	12.5	250
915 MHz	10	5 bit PSSH	ASK	50	250
868MHz	1	16 array DSSS	O-QPSK	25	100
915MHz	10	16 array DSSS	O-QPSK	62.5	250

## **Capa MAC**

La MAC ofrece dos tipos de servicios hacia las capas superiores, el acceso a estos servicios es a través de los puntos de acceso al servicio (Service Access Point – SAP). Los servicios que ofrece la MAC son: servicio de datos MAC a la cual se accede por medio de la parte común de la subcapa MAC (MAC Common Part Sublayer - MCPS) y el servicio de administración MAC al cual se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MAC Layer Management Entity - MLME) [7] [8]. Estos dos servicios proporcionan una interfase entre las SSCS y la LLC con la capa física. La información se administra a través de MCPS y las funciones de monitoreo y control a través de la MLME.

Entre las funciones de la capa MAC tenemos: gestión del acceso al medio, la fiabilidad mediante el uso de acuses de recibo (Acknowledgement – ACK), la asociación y la seguridad. El uso de ACK es opcional puesto que existen aplicaciones que no requieren confirmación, otra razón para que el ACK sea opcional es la eficiencia energética, ya que el uso de ACK implica un mayor consumo de energía puesto que el nodo está activo hasta recibir el ACK.

Con respecto al acceso al medio, la utilización de tramas Beacons no es obligatoria, en el caso de acceso CSMA/CA no se utiliza tramas Beacons debido a que los nodos no guardan información de otros nodos de la red. Para los casos de CSMA/CA ranurado o TDMA por su característica de sincronismo entre todos los nodos de la red y el uso de Supertrama obligatoriamente se utilizan tramas Beacons [8].

## **Tramas MAC**

El protocolo posee cuatro diferentes tramas con funciones únicas: Información(data), Reconocimiento (ACK), Baliza (Beacon) y Comando MAC (MAC Command) [1].

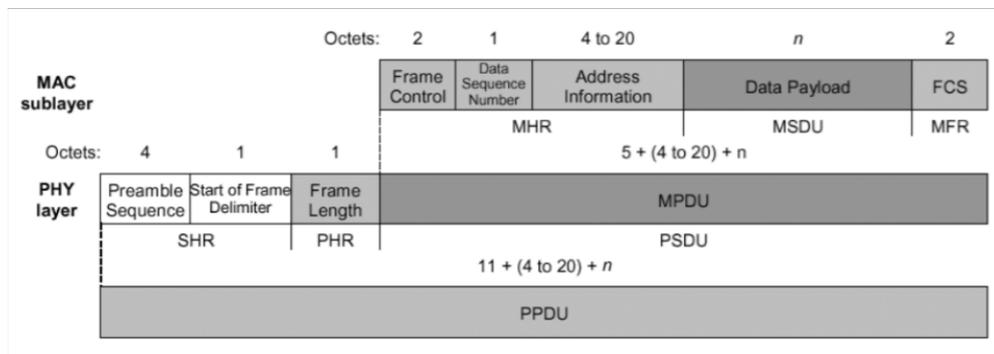
Data: la trama lleva la información en el payload.

ACK: esta trama es usada por un nodo receptor para indicar al nodo transmisor que el paquete llegó sin error.

Beacon: este tipo de trama es utilizada por nodos que pueden estar implementando modos de ahorro de energía, otra opción es que los nodos coordinadores estén intentando establecer una red. Además, esta trama permite a nodos encontrar una red ya existente.

MAC Command: esta trama provee la capacidad de enviar comandos de bajo nivel de un nodo a otro.

La estructura de todas las tramas es similar, a continuación, se muestra una trama de datos.



**Figura 1.3.** Trama de datos [1]

Synchronization header (SHR): contiene un preámbulo de 32 bits y el delimitador de inicio de trama de 8 bits, el preámbulo permite la sincronización de la señal entrante.

PHY header (PHR): es de 8 bits e indica la longitud del PSDU.

PHY Service Data Unit (PSDU): la cual está compuesta por tres subcapas que son; MAC Header (MHR), MAC Service Data Unit (MSDU) y MAC Footer (MFR).

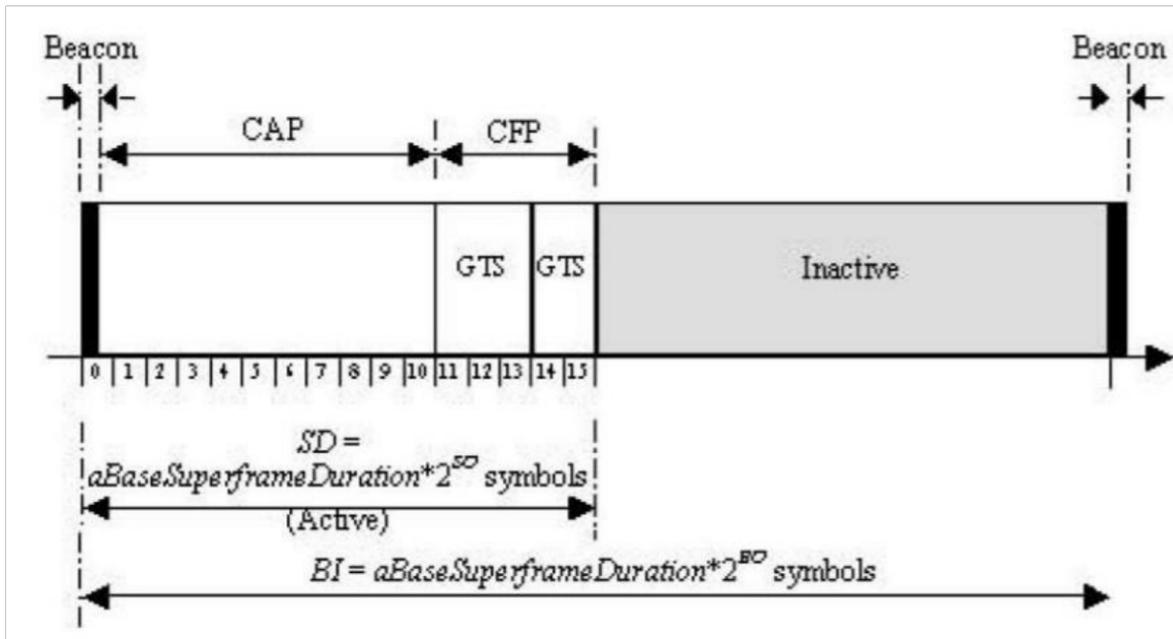
MAC Header (MHR): Contiene un control de trama de 2 octetos, un número de secuencia de 1 octeto para reensamblar paquetes que no vengan en orden y la información de dirección de 4 a 20 octetos.

MAC Service Data Unit (MSDU): lleva la carga útil y puede tener un máximo de 104 octetos.

MAC Footer (MFR): contiene una secuencia de verificación de trama de 2 octetos.

### Supertrama

La supertrama está delimitada por tramas de tipo Beacon, estas tramas Beacon son enviadas por el nodo PANC y contienen información para que otros nodos puedan conectarse y sincronizarse a la red. La supertrama consta de tres partes que son: Periodo de acceso por contienda (Contention Access Period - CAP), Periodo libre de contienda (Contention Free Period - CFP) y un periodo inactivo (Inactive). A continuación, se muestra una imagen de supertrama [7].



**Figura 1.4.** Supertrama [8]

CAP: Es el intervalo de tiempo durante el cual los nodos competirán para transmitir en ranuras de tiempo (timeslot) usando el protocolo de Acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA-CA), el motivo de la contienda es que las ranuras no están preasignadas [7].

CFP: Se define como el periodo durante el cual se ofrecen ranuras de tiempo garantizadas (Guaranteed Time Slots - GTS), estos GTS son ofrecidos a los nodos que requieran una transmisión con latencia limitada, es decir no se utiliza CSMA-CA en este periodo ya que las ranuras están preasignadas.

Inactive period: Durante este periodo ningún nodo puede transmitir es decir los nodos entran en modo de bajo consumo (Sleep). La supertrama vuelve a repetirse al siguiente envío de un beacon y continua sucesivamente.

### **Métodos de acceso al canal**

El estándar define dos métodos de acceso al canal: el modo de trama beacon habilitado (Beacon Enabled – BE) y el modo de trama beacon no habilitado (Non-beacon Enabled – NBE).

El modo BE provee un mecanismo de administración de potencia basado en ciclos de trabajo que es la que usa la estructura de Supertrama limitada por tramas beacon que son generadas periódicamente por el nodo coordinador y las cuales proveen de sincronismo a

la red y para el acceso al canal trabajan con CSMA-CA, GTS y periodo inactivo. El modo NBE no posee una supertrama, esta falencia causa falta de sincronismo, el ahorro de energía se delega a capas superiores ya que los nodos están siempre activos y trabaja con CSMA-CA para el acceso a los canales.

#### **1.4.2 Protocolo 802.15.4e**

Este protocolo fue desarrollado por el Task Group (TG4) de IEEE 802.15, luego de varias revisiones del mismo IEEE fue publicado en abril de 2012 [8]. El objetivo fue diseñarlo para dar soporte a mercados industriales, pero los cambios más importantes están en los modos de operación que veremos más adelante, estos modos también conocidos como modos de comportamiento MAC permiten tener características de estándares ya existentes como acceso por ranuras, ranuras compartidas y dedicadas, comunicación multicanal y saltos de frecuencia.

Las mejoras que se añadieron son las siguientes:

##### **Asociación rápida (Fast Association - FastA)**

El procedimiento de asociación en el protocolo 802.15.4 implica un retraso significativo ya que el nodo debe esperar hasta el final de la respuesta MAC y luego solicitar los datos de asociación del coordinador, esa espera es por el tiempo del periodo Inactive para ahorrar energía. Entonces en aplicaciones en las que el tiempo es crítico, 802.15.4e introduce un mecanismo de asociación rápida mediante el cual cada nodo solicita una asociación al coordinador, en caso de existencia de suficientes recursos, el coordinador envía una respuesta con la dirección corta asignada al nodo y un indicador de estado que representa asociación exitosa, todo a costa de una baja eficiencia energética.

##### **Formato de trama MAC 802.15.4e**

El formato de trama MAC 802.15.4e presenta tres partes principales: cabecera MAC (MAC Header - MHR), carga útil MAC (MAC Payload) y la finalización MAC (MAC Footer - MFR) [7].

Octets: 1/2	0/1	0/2	0/1/2/8	0/2	0/1/2/8	0/1/5/6/1 0/14	variable	variable	2	
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Information Elements		Frame Payload	FCS
		Addressing fields					Header IEs	Payload IEs		
MHR							MAC Payload		MFR	

**Figura 1.5.** Formato de trama MAC 802.15.4e [8]

La cabecera MHR está formado por varios campos que son los siguientes:

- Frame Control. Especifica el tipo de trama.
- Sequence Number. Indica el número único a la trama.
- Addressing Fields. Está compuesto por cuatro campos que indican la dirección y el Id PAN de destino y fuente.
- Auxiliary Security Header. Es un campo opcional utilizado por mecanismos de seguridad de capas superiores.
- Information Elements (IEs). Son cabeceras que aportan datos adicionales que se utilizan en el funcionamiento de determinados elementos y componentes de subnivel.

La MAC Payload transporta la carga de los elementos de información (IE) y la carga de la trama en la cual también lleva información para capas superiores.

Por último, tenemos el MFR en el que se encuentra la secuencia de control de trama (FCS) que sirven para validar la integridad de la información recibida.

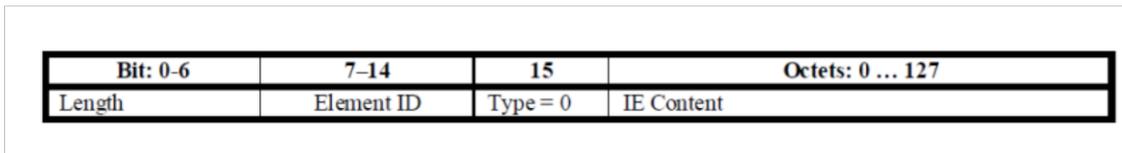
### **Information Elements (IE)**

El IE se ha definido como un método para el encapsulamiento de información, se caracteriza por ser extensible y sencillo de implementar [9]. El formato de un IE está compuesto por un identificador (ID), un campo de longitud (Length) y un campo de contenido (Content).

La información que proporcionan los IE es utilizada para encapsular datos de sincronismo, estado de red entre otros. Se dice que su implementación es sencilla y flexible porque permite añadir nuevas definiciones de IE de futuras versiones, esta característica vuelve al estándar compatible con normas y desarrollos que aparecerán con el pasar del tiempo.

En la trama MAC 802.15.4e se pudo observar que los elementos de información (IE) están en el MHR y en el MAC Payload, la razón es que son procesadas inmediatamente por la capa MAC y enviadas al punto de acceso al servicio a través del cual llegarán a las capas superiores.

En cuanto a la estructura, el IE está compuesto de un descriptor IE cuyo formato cambia en la cabecera y en el payload del IE.



**Figura 1.6.** Formato de cabecera del elemento de información [8]

La cabecera está compuesta de: campo Length que indica la longitud, Element ID que es un identificador único para IE y el campo Type que indica el tipo de IE.

El contenido del IE es de longitud variable que cambia dependiendo del modo de funcionamiento (DSME, TSCH, LLDN, etc.) y modos de comportamientos concretos (CSL, RIT, ACKs, etc.). [8]

### **Baliza mejorada y Solicitud de baliza mejorada**

Las tramas de baliza mejoradas (Enhanced beacon - EB) son extensiones de las tramas beacon del estándar 802.11, la idea es lograr mayor flexibilidad en el contenido de la trama beacon 802.15.4, para lo cual se usa el campo de versión de trama (Frame Version) para diferenciar el Beacon del protocolo 802.15.4 y un Enhanced Beacon 802.15.4e, para un EB el campo tendrá el valor de 0b10.

La solicitud de baliza mejorada (Enhanced Beacon Request - EBR) es una extensión de los comandos MAC Beacon Request, se lo puede diferenciar por el campo Frame Version también con el valor de 0b10. Estos comandos son empleados para solicitar EB, estas balizas mejoradas deben incluir la información solicitada por el EBR, lo que permite reducir el tamaño de la trama y actuar como filtro al especificar lo que debe venir en la respuesta beacon.

La trama EB tiene campos IE en la cabecera y en el payload como podemos observar a continuación.

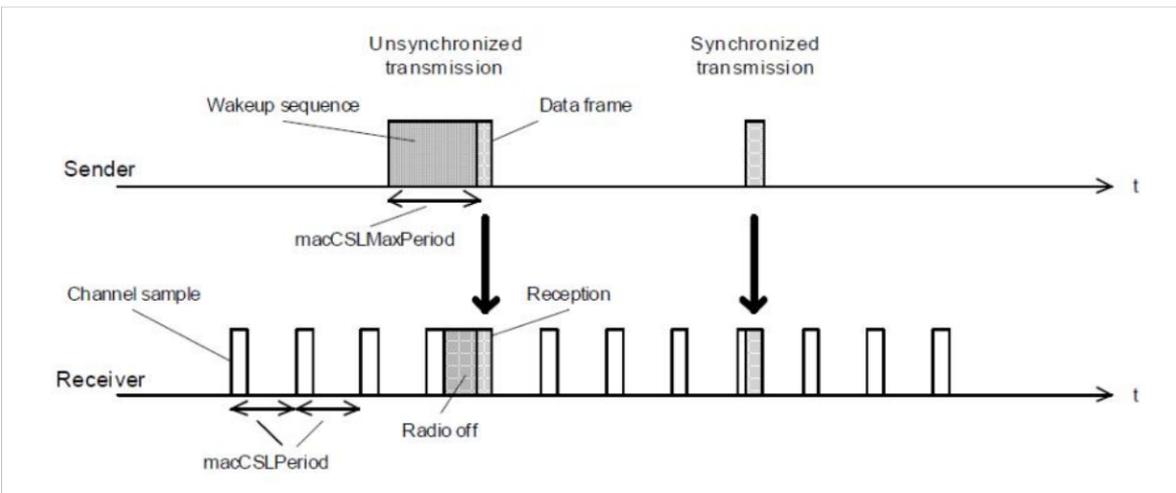
Octets: 1/2	0/1	variable	0/1/5/6/10/ 14	variable	variable	2	
Frame Control	Sequence Number	Addressing fields	Auxiliary Security Header	Information Elements		Beacon Payload	FCS
				Header IEs	Payload IEs		
MHR				MAC payload		MFR	

**Figura 1.7.** Formato de cabecera de trama EB [7]

**Energía baja (Low Energy – LE)**

El estándar define el protocolo low energy que permite a los nodos operar bajo un ciclo de trabajo de la fracción del 1% [8]. El protocolo incorpora dos mecanismos que garantizan menor consumo de energía:

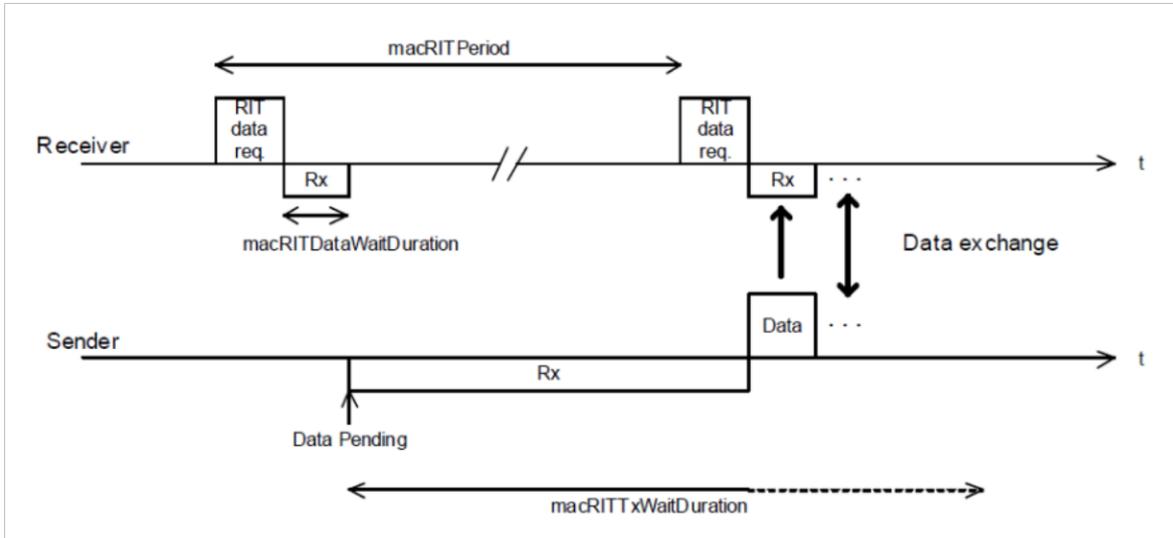
CSL: es un mecanismo que se basa en la escucha periódica del canal por parte del receptor que está esperando solicitudes de transmisión. De este modo, si el receptor recibe una trama wakeup con su misma dirección MAC, el mecanismo desactiva el receptor durante un tiempo específico (rendezvous time - RZ time), este tiempo está incluido en la trama wakeup. El valor del parámetro RZ Time entonces indica el tiempo entre el final de la trama wakeup y el principio de la trama de datos, por lo tanto, el receptor sabrá exactamente cuándo despertarse para empezar a recibir los datos del emisor.



**Figura 1.8.** Funcionamiento de mecanismo CSL [7]

El mecanismo RIT: es utilizado en redes PAN que no utilizan tramas beacons, entonces el mecanismo debe basarse en el envío de tramas datareq de forma periódica utilizando CSMA-CA no ranurado. Por lo tanto, cada vez que el receptor envía una de estas tramas,

posteriormente se escucha el canal durante un tiempo corto para recibir transmisiones. El emisor espera a recibir una trama datareq para empezar a transmitir inmediatamente una trama de datos.



**Figura 1.9.** Funcionamiento de mecanismo RIT [8]

### Métricas de rendimiento MAC

La enmienda 802.15.4e admite una retroalimentación hacia capas superiores, la cual consiste en informar: el número de tramas transmitidas que requirieron uno o más intentos hasta recibir ACK, el número de tramas de las cuales nunca llegó un ACK pasado un tiempo `macMaxFrameRetries`, el número de tramas que fueron reconocidas correctamente dentro de un periodo de tiempo y la cantidad de tramas recibidas que se descartaron debido a problemas de seguridad. Esta información puede ayudar por ejemplo a la capa de red en la toma de decisiones para un buen enrutamiento lo que se traduce en reducción del consumo de energía, disminución de latencia y enrutamiento eficiente.

### Modos de operación

Existen cinco modos de operación: Time Slotted Channel Hopping (TSCH), Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME), Low Latency Deterministic Network (LLDN), Asynchronous Multi-channel Adaptation (AMCA) y Radio Frequency Identification Blink (BLINK) [10].

#### 1.4.2.1 Modo TSCH (Time Slotted Channel Hopping)

TSCH es una combinación de Acceso por ranuras de tiempo con Multicanal y Salto de canal, está dirigida a aplicaciones como: automatización industrial, control de procesos,

comunicación multicanal y multisalto. El acceso por ranuras de tiempo permite la eliminación de colisiones entre nodos competidores y se obtiene una latencia determinística, el multicanal permite que más nodos intercambien tramas al mismo tiempo, el salto de canal mitiga los efectos de interferencia y desvanecimiento por múltiples trayectorias (Multipath Fading). Estas características proporcionan mayor capacidad, alta confiabilidad y latencia predecible, para lograr eficiencia energética se utiliza ciclos de trabajo muy pequeños lo cual es posible gracias a su modo de acceso y es independiente de la topología (estrella, malla, árbol).

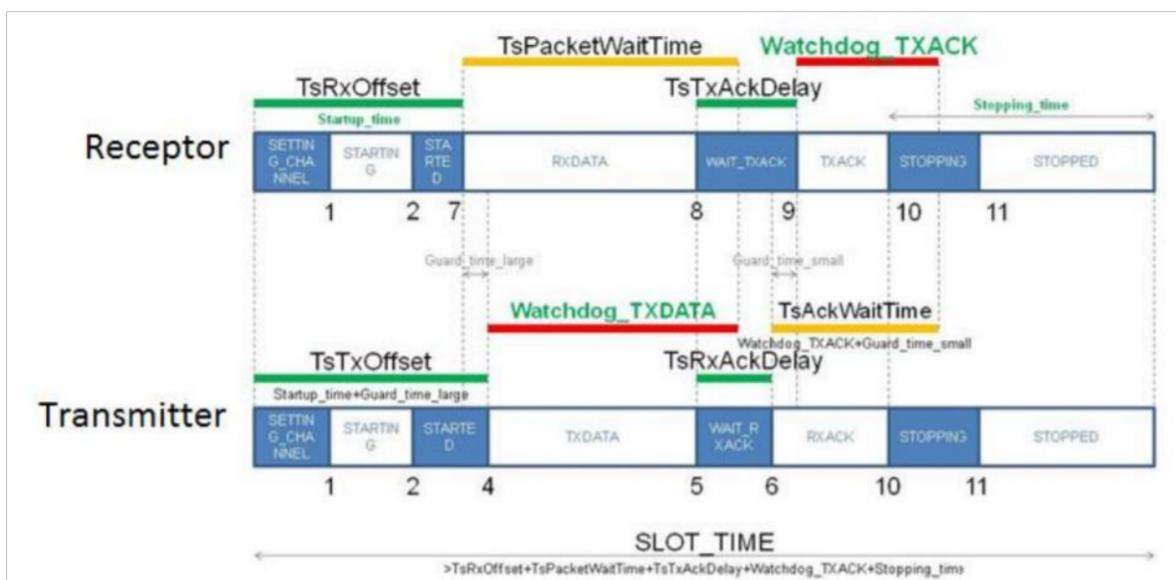
### Características de TSCH

#### Estructura y sincronización de trama de intervalos de tiempo (Slotframe)

Los nodos en este modo de operación se sincronizan en un slotframe periódico que está compuesto de varias ranuras de tiempo. Cada nodo obtiene información de sincronización, salto de canal, ranura de tiempo y slotframe de los Enhanced beacon, estos beacons mejorados son enviados por otros nodos para anunciarse en la red.

Una vez que el nodo se sincroniza con la red, se inicializa su slotframe y empieza a transmitir beacons, estos slotframes se repiten automáticamente. Dentro de estos slotframes existen ranuras que permiten que cada nodo envíe una trama de datos máxima y luego reciba su respectivo ACK, si el ACK no es recibido en un tiempo predefinido se hace una retransmisión de la misma trama de datos en la misma ranura que tiene asignada.

A continuación, se muestra la estructura de una ranura de tiempo, así como los distintos tiempos dentro del modo de operación.



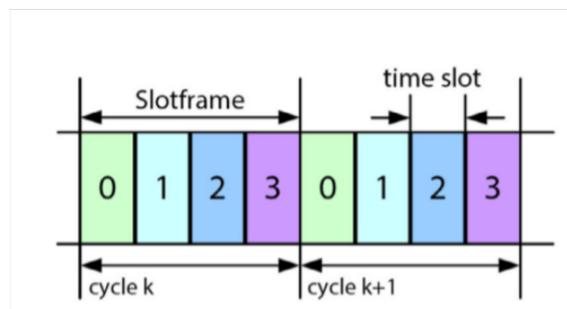
**Figura 1.10.** Organización y estructura de una ranura de tiempo [8]

Cuando empieza una ranura, el transmisor espera un tiempo  $TsTxOffset$  (periodo en microsegundos) y empieza a transmitir el paquete de información, luego espera un tiempo  $TsRxACKDelay$  para cambiar a modo recepción y esperar la llegada de la confirmación de recepción (ACK) del nodo receptor. En caso de que el ACK no se reciba dentro de un periodo de tiempo  $TsAckWaitTime$ , se entiende que no existirá una confirmación del nodo receptor y apagara el radio para ahorrar energía.

En el lado del receptor al inicio de la ranura de tiempo se espera un  $TsRxOffset$  y activa su radio esperando la recepción de un paquete, el nodo permanece en ese estado por un tiempo definido por  $TsPacketWaitTime$ . Una vez que llegue el paquete, el receptor espera un periodo  $TsTxAckDelay$  para enviar un ACK.

Podemos notar que el  $TsRxOffset$  del receptor es menor que el  $TsTxOffset$  del transmisor y empieza a escuchar antes de que el emisor transmita su paquete, a este periodo se le llama tiempo de guarda y si no llega ningún paquete al nodo receptor en dicho periodo se entiende que no llegará nada y se apaga el radio para ahorrar energía.

La transmisión y confirmación de un paquete se puede hacer dentro una misma ranura de tiempo, con respecto al periodo de espera que está luego de la recepción de un paquete, es decir, el periodo antes del envío de un ACK es el tiempo que el nodo transmisor necesita para configurar la interfaz de radio y cambiar de modo transmisión a escucha y viceversa en el nodo receptor. El último periodo es el de parada en el cual los nodos transmisor y receptor luego del envío y recepción de la confirmación pasan a modo sleep hasta que tengan otra ranura de tiempo asignada para transmitir datos.



**Figura 1.11** Slotframe de TSCH [11]

La sincronización físicamente está basada en cristales de cuarzo que sirven como base al contar las oscilaciones producidas, pero al ser un material físico delicado puede presentar

defectos, por este motivo se deben implementar mecanismos para mantener la sincronización.

Existen dos formas de conseguir sincronismo en los nodos de la red: basado en trama y basado en ACK. El sincronismo basado en tramas consiste en tomar nota, cada vez que el receptor recibe una trama, el nodo anota el momento en empezó a recibir y luego le añade el  $TsTxOffset$  que ya es conocido. Para el sincronismo basado en ACK, el nodo emisor envía una trama al receptor y este anota el instante de la recepción de trama, este dato luego inserta en el ACK que mandará al emisor, una vez que llega la confirmación al emisor, este utiliza ese valor que le llega en el ACK para realinear el reloj.

De este modo mientras exista tráfico en la red, los nodos estarán sincronizados, incluso si no hay datos para transmitir durante 30 segundos se enviarán tramas de datos vacíos solo para mantener la sincronización.

### **Retransmisión**

El proceso de retransmisión se emplea cuando el nodo emisor ha enviado una trama y luego de esperar la llegada de un Ack durante el periodo  $TsAckWaitTime$ , no se ha recibido nada, o el ACK que ha llegado contiene errores. Dadas las circunstancias del caso anterior el nodo emisor determinará que la transmisión ha sido fallida, entonces para la siguiente ranura que le corresponde se repite el proceso de transmisión y queda otra vez a la espera de una confirmación.

En caso de que las transmisiones siguientes sean fallidas, el proceso se repetirá N veces siendo N un número dependiente de la implementación del estándar, si las retransmisiones superan este N, el nodo asume que la transmisión no se ha podido realizar y notifica a las capas superiores.

### **Salto de canal (Channel hopping)**

Es la principal característica de TSCH, inicialmente hay 16 canales diferentes los cuales están identificados por el parámetro Channel Offset, este es un número entero en el rango de cero a quince, sin embargo, algunos canales tienen una baja calidad y son enviados a la lista negra, por lo tanto, se dispondrá de menos canales útiles que los 16 iniciales.

El enlace de comunicación se asigna a pares de nodos, la asignación consta de una ranura de tiempo dentro del slotframe y un Channel Offset, estos dos parámetros representan a una comunicación entre nodos, la frecuencia que se utilizará en la comunicación se obtiene con la siguiente fórmula:

$$f = F[(ASN + channelOffset)\%N_{channels}] \quad (1.1) [12]$$

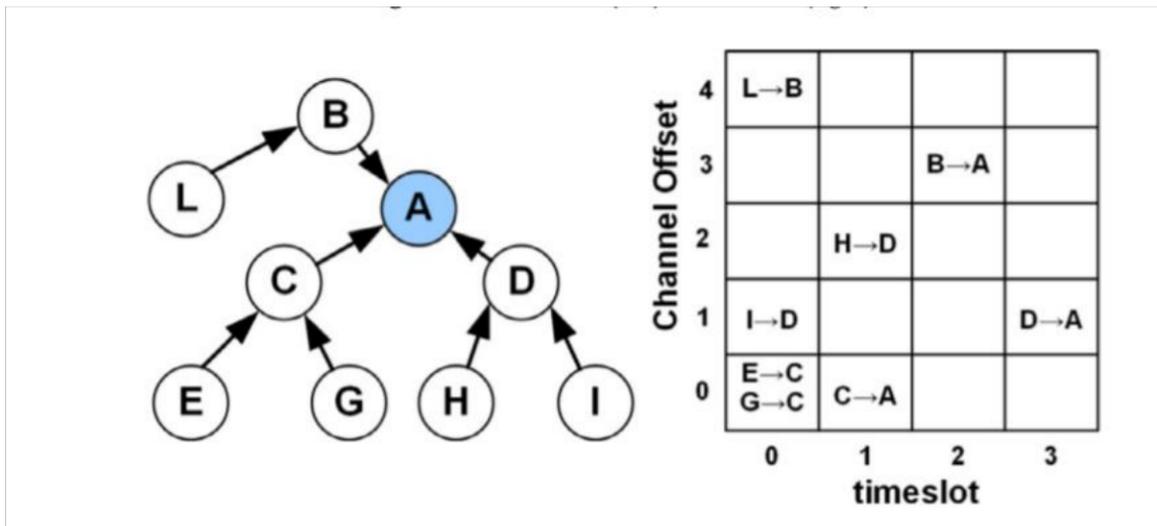
Donde:

ASN es el número de ranuras que ha transcurrido desde el inicio de la comunicación o un inicio arbitrario determinado por el PAN coordinator.

F es una función que se puede implementar como una tabla de búsqueda.

% es un operador de modulo.

La ecuación (1.1) implementa un salto de canal diferente al devolver una frecuencia para un mismo enlace en diferentes ranuras, esto se debe a que el ASN varía globalmente en la red. Con el salto de canal se asegura que todos los canales disponibles sean usados y por consiguiente se reduce el efecto negativo de la interferencia. Otro punto importante es que puede hacerse una asignación compartida cuando dos nodos transmiten hacia un mismo destino, es decir, comparten la misma asignación.



**Figura 1.12.** Red de sensores con topología tipo árbol y asignación de enlaces para datos [13]

### Algoritmo TSCH CSMA-CA

El algoritmo se ejecuta cuando ya están los nodos conectados y estos pueden acceder simultáneamente a una misma ranura de tiempo y con un mismo channel offset (asignación compartida), cuando ocurre esto es probable que en algún momento se produzcan colisiones que provoquen una falla en la transmisión. Para reducir dichas colisiones el estándar redefine el algoritmo CSMA-CA.

El proceso para que un nodo emisor envíe una trama de datos a otro nodo receptor es esperar la llegada de una asignación, una vez que el enlace ha sido asignado se empieza a enviar las tramas de datos. Luego del envío de una trama de datos se espera la llegada de un ACK y en caso de que este no llegue se deduce que se produjo una colisión. Cuando tenemos un caso como este es necesario ejecutar el algoritmo TSCH CSMA-CA, el cual consta de los siguientes pasos:

1. Se inicializa un conjunto de variables como son el número de retransmisiones realizadas para la trama en curso ( $NB = 0$ ) y el exponente de retroceso (Backoff exponent – BE) toma el valor de  $macMinBE$ .
2. Se genera un número aleatorio  $w$  entre el rango  $[0 - 2^{BE}]$
3. La retransmisión de la trama en curso es aplazada por un lapso de  $w$  enlaces dirigidos hacia el nodo R o hasta que se encuentre un enlace hacia el nodo R.
4. Si la retransmisión ocurre en un enlace compartido y es exitosa, es decir, hubo recepción de ACK, se resetea el valor de BE a su valor  $macMinBE$  y el algoritmo termina. Pero si la retransmisión no tiene éxito las variables cambian a los siguientes valores:  $NB = NB + 1$ ,  $BE = \min(BE + 1, macMaxBE)$ . En el peor de los casos si el número de retransmisiones excede cierto valor máximo la trama se descarta.

Si la retransmisión se hace en un enlace dedicado y es exitosa el BE vuelve a su valor inicial  $macMinBE$ , pero si existen otras tramas dirigidas al mismo destino el BE no se modifica.

El mecanismo de retroceso (Backoff) en TSCH es diferente al del protocolo anterior ya que en lugar de evitar colisiones lo que se hace es actuar cuando las colisiones ya sucedieron, es decir, el mecanismo evita que se repitan colisiones. En cuanto a la duración de Backoff corresponde a una ranura compartida, el uso de una ranura como unidad de retroceso asegura que un nodo pueda experimentar colisión solo si otros nodos acceden a la misma ranura.

La evaluación del canal libre u ocupado (Clear channel assessment - CCA), Esta evaluación en el protocolo anterior tiene como objetivo evitar colisiones con una transmisión que ya está en curso, en TSCH al estar los nodos sincronizados y tienen sus ranuras asignadas se garantiza que no haya transmisiones en el momento que se realiza un CCA. En TSCH el CCA es opcional y tiene un nuevo objetivo que es evitar la transmisión de paquetes si se detecta una fuerte interferencia.

Para descartar un paquete en el protocolo anterior se lo hacía si el canal estaba ocupado durante un periodo de `macMaxCSMABackoff` veces consecutivas, en TSCH se establece un número máximo de retransmisiones (`macMaxFrameRetries`).

#### **1.4.2.2 Modo DSME (Deterministic and Synchronous Multi-Channel Extension)**

El modo DSME está dirigido al sector industrial y comercial con la diferencia que sus requerimientos de confiabilidad y puntualidad son más estrictos, para lograr esto se combinan división de tiempo, acceso al medio por contienda y diversidad de canales, estas características le hacen útil en redes malla y multisalto. DSME se deriva del modo Beacon Enable en el cual se introducen mejoras notables, por otro lado al igual que su antecesor el tiempo se divide en periodos de acceso al canal (CAP) y periodos libres de colisiones (CFP), lo que cambia es el incremento en el número de periodos GTS y el manejo de supertramas, estas características hacen a DSME más flexible para adaptarse al tráfico periódico y aperiódico incluso en grandes redes con múltiples saltos, la robustez y la fiabilidad incrementan con sus dos estrategias de diversidad de canales, incluso en condiciones de canales variables.

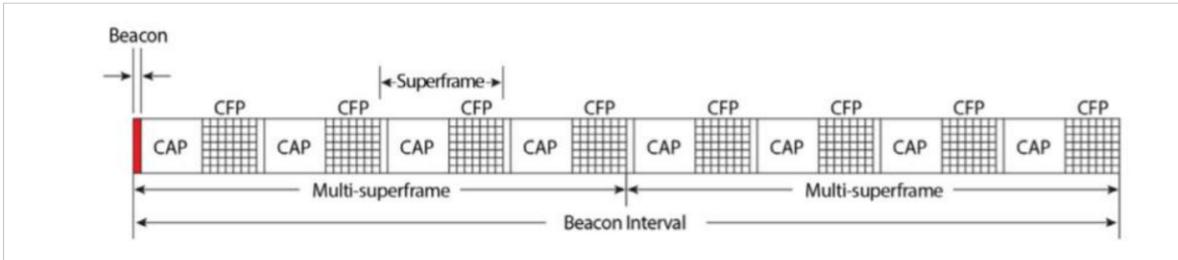
En modo DSME los nodos vecinos pueden comunicarse con enlaces dedicado punto-punto que añadiendo su latencia determinística resulta en una solución ideal para cubrir redes de varios saltos. Otra de las características es que la asignación de ranuras y programación de balizas se realizan de manera distribuida sin la necesidad de un nodo coordinador. Además, dado que un par de nodos pueden asignar o no ranuras GTS acorde a su necesidad, DSME puede adaptarse rápidamente al tipo de tráfico y a los cambios en la topología de red sin requerir nuevamente cálculos para programar nuevas ranuras. La variación de topología y tráfico traen como consecuencia ejecución de algoritmos complejos, intercambios de tramas en grandes cantidades y nuevos cálculos de ranuras, pero el modo DSME admite una opción de reconocimiento grupal de ACK que permite agregar varios acuses de recibo en un solo ACK, de esta forma se mejora la eficiencia energética y no existe un alto flujo de tramas en la red.

#### **Características de DSME**

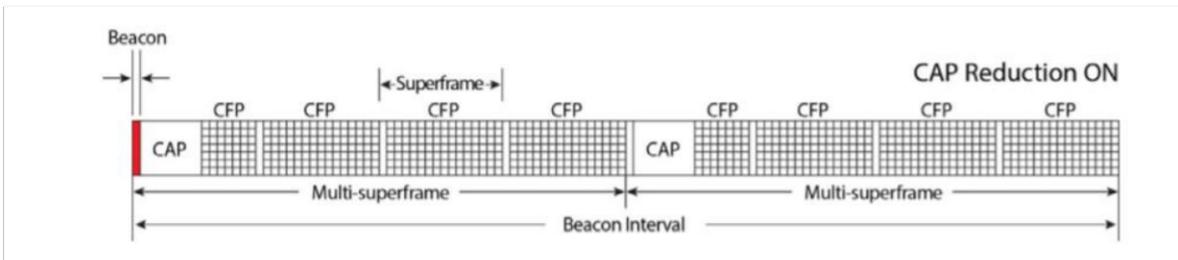
##### **Estructura de multisupertrama**

En una red DSME, algunos nodos coordinadores transmiten periódicamente tramas EB, las cuales se utilizan para mantener a los nodos sincronizados y a la vez permite que

nuevos nodos se unan a la red. El periodo de tiempo entre dos EB se denomina Intervalo de Baliza (Beacon Interval – BI) que este compuesto por varias supertramas. Debido a que en DSME no hay periodos inactivos las supertramas se suceden a la perfección, dentro de un BI se puede definir ciclos de supertramas repetidas, a este conjunto de supertramas se le denomina multisupertrama [13].



**Figura 1.13.** Estructura de multisupertrama DSME [13]



**Figura 1.14.** Estructura de multisupertrama DSME con reducción CAP [13]

Al igual que en el modo BE, la supertrama está dividida en 16 ranuras numeradas de 0 a 15, podemos notar tres partes: ranura de baliza mejorada, periodo de acceso de contención (CAP) y periodo libre de colisiones (CFP).

La ranura cero se utiliza para el EB, los coordinadores envían sus tramas EB solo en la supertrama que les es asignada a través del mecanismo de asignación distribuida.

El CAP comienza después del EB y finaliza en la ranura 8, lleva mensajes de control o datos urgentes o aperiódicos, durante este periodo se utiliza CSMA-CA como acceso al medio [10]. Para el envío del EB y de las tramas dentro del CAP se utiliza el mismo canal, este canal es escogido por el nodo coordinador que también usa para formar la red y para la asociación de los nodos. Los nodos para poder transmitir dentro del CAP necesitan encontrarse dentro de la distancia de transmisión y estar encendidos durante la duración del CAP.

EL CFP está compuesto por las siete ranuras restantes cuya numeración es del 9 al 15, los intervalos dentro del CFP están garantizados por lo cual se los denomina DSME-GTS. Durante estos intervalos garantizados se transmite tráfico periódico y datos cuya latencia debe ser predecible. A diferencia del CAP se pueden acomodar múltiples transmisiones durante el DSME-GTS utilizando diferentes canales. La identificación de un DSME-GTS de la supertrama que a su vez está dentro de una multisupertrama se la realiza mediante un ID asociado y la numeración según su posición dentro del CFP [14].

Para ahorrar energía, DSME activa el mecanismo reducción del CAP el cual consiste en que solo la primera supertrama de cada multisupertrama presenta CAP y en las demás se omite, por consiguiente, el CFP consta de 15 DSME-GTS en las siguientes supertramas. La reducción del CAP es posible gracias a tres parámetros: el primero determina la duración de la supertrama ( $macSuperframeOrder - SO$ ), el segundo determina la duración de la multisupertrama ( $macMultisuperframeOrder - MO$ ) y el último la duración del intervalo entre beacon ( $macBeaconOrder - BO$ ). Se debe cumplir la siguiente inecuación:

$$0 \leq SO \leq MO \leq BO \leq 14$$

Los valores de los parámetros los escoge el diseñador de red teniendo en cuenta que: el SO influye en la duración del CAP y de las ranuras DSME – GTS, MO determina el número de DSME- GTS que están disponibles en la multisupertrama, además influencia en las latencias de las transmisiones [10].

.

### **Balizas mejoradas (Enhanced beacons - EB)**

Los coordinadores envían los EB en intervalos regulares al inicio de la supertrama en su ranura dedicada. Sin embargo, los EB pueden experimentar colisiones debido a la interferencia con otros dispositivos fuera de la red, ante esta situación el coordinador puede utilizar la opción de beacon diferido para reducir la probabilidad de colisión.

La opción de beacon diferido consiste en hacer un CCA antes de enviar la trama beacon, primero se confirma mediante el CCA que el canal este libre para enviar el EB.

El contenido del EB incluye: el Elemento de información del descriptor PAN DSME el cual contiene la información de la supertrama ( $SO$ ,  $MO$  Y  $BO$ ) [14], opciones como: modo diversidad de canales, reducción CAP, baliza diferida y ACK de grupo, otro campo es el  $SDIndex$  de la supertrama actual para identificar la supertrama dentro del intervalo Beacon, este  $SDIndex$  comienza en cero que representa la supertrama utilizada por el coordinador para el envío de EB.

EL sincronismo también se logra utilizando tramas EB, cuando un nodo se une a la red debe asociarse a un coordinador y buscar dichas tramas del coordinador, esta búsqueda se la hace esperando en un canal por un periodo igual al tamaño de un beacon máximo (BO = 14) y si no recibe un EB, el nodo cambia al siguiente canal de la lista [13]. Cuando ya se descubra a los coordinadores el nodo se asocia a uno de ellos, este coordinador se convierte en su padre de sincronización.

Cuando un coordinador se une a una red, transmite su información de asignación a través de sus tramas EB, para lograr esto tuvo que buscar una ranura marcada como cero en los mapas de bits que recibe, cuando ya la encuentra este nuevo coordinador la usa como suya e informa a sus vecinos a través del comando DSME-Beacon Allocation Notification que se utiliza para informar la asignación, se debe enviarlo en el periodo CAP. Por supuesto puede producirse colisiones si dos nodos compiten por la misma ranura, esto es lo que se conoce como nodo oculto, sucede cuando dos nodos están ocultos entre si (no escuchan las transmisiones el uno del otro) y por tanto los dos envían a sus vecinos a través de un comando de asignación de baliza DSME que tiene asignado una ranura para su trama EB, los nodos vecinos comunes para evitar este inconveniente, envían una notificación de colisión DSME Beacon a los nodos que notificaron su asignación para que elijan un ranura de EB diferente.

### **Diversidad de canales**

Para ofrecer comunicación multicanal durante el DSME-GTS, DSME utiliza dos métodos, estos son: Adaptación de Canal y Salto de Canal [14] [13].

El modo de adaptación de canal consiste en que dos nodos vecinos pueden escoger comunicarse escogiendo cualquier canal que esté disponible. Esto sucede en la fase de asignación del DSME-GTS, es decir, cada vez que se inicia el GTS los nodos cambian al canal negociado en la asignación, sin embargo, en el caso de que se deteriore la calidad del mismo se recomienda una nueva asignación para cambiar a un nuevo DSME-GTS con mejor calidad.

En el modo de salto de canal los nodos cambian de canal de comunicación siguiendo una secuencia predefinida (secuencia de salto), dicha secuencia es decidida por el coordinador, los nodos empiezan a saltar desde diferentes posiciones en la secuencia, la posición de estos nodos depende de la compensación de canal que es un número entero que se le da al nodo durante la asociación a la red, se debe evitar asignar la misma compensación a nodos vecinos.

Para la comunicación entre nodos, es necesario que el transmisor deba cambiar al canal utilizado por el receptor para lo cual es necesario utilizar un desplazamiento de canal que es fijo para cada nodo.

### **ACK de grupo**

La opción de reconocimiento grupal (ACK grupal) proporcionada por DSME permite gran rentabilidad en los casos en que los nodos tienen que enviar tráfico periódico a los coordinadores. Los coordinadores utilizan estos ACK grupales los cuales constan de una sola trama que contiene todas las confirmaciones de las tramas de datos recibidas en los DSME-GTS anteriores [15]. Además, los coordinadores pueden especificar un DSME-GTS dentro de la multisupertrama en el cual puedan ser retransmitidas todas las tramas que no han sido correctamente recibidas.

El coordinador al habilitar la opción ACK grupal también asigna dos DSME-GTS nombrados GACK1 y GACK2 [13], que se utilizarán para enviar tramas de reconocimiento a los nodos asociados. El GACK1 se utiliza para enviar ACK de las tramas recibidas desde la ranura 0 hasta GACK1 y GACK2 es usado para enviar ACK de las tramas recibidas desde GACK1 hasta GACK2. Desde ese momento los Beacon que envía el coordinador indican a través de una bandera que la opción ACK de grupo estaba activada, además contienen los IDs de supertrama, GACK1 y GACK2.

Por otro lado, los nodos para aprovechar la función GACK asignan dos DSME-GTS hacia el coordinador: uno antes del GACK1 y otro entre el GACK1 y el GACK2 [13]. El primero es usado para transmitir la trama y el segundo para hacer una retransmisión en caso de que falle su primer intento. Luego de que el nodo envíe la trama tiene que esperar el GACK1 para saber si su transmisión tuvo éxito, la manera en que lo sabe es mediante un mapa de bits que envía el coordinador a los nodos, en el caso de no tener éxito se realiza una retransmisión en el segundo GTS hacia el coordinador y nuevamente espera el GACK2 para verificar si su transmisión falló o no al analizar el mapa de bits.

### **Gestión DSME-GTS**

La gestión en DSME permite que dos nodos vecinos operen en una porción de supertrama asegurándose que ningún otro nodo de la red interfiera en la comunicación, el DSME-GTS es asignado por el nodo destino en función de los requerimientos del nodo origen y la disponibilidad de ranuras.

Los DSME-GTS pueden ser desasignados en cualquier momento por cualquiera de los nodos involucrados en la comunicación, las razones por las que puede ocurrir una desasignación son:

- Expiración porque el nodo transmisor ya no usa el DSME-GTS [13].
- El nodo receptor no recibe una trama de datos durante el `macDSMEGTSEExpirationTime` (7 multisupertramas consecutivas por defecto).
- La calidad del enlace es mala, es decir no se recibe ACK durante el `macDSMEGTSEExpirationTime` [16].

Para la gestión del DSME-GTS, cada nodo almacena dos estructuras de datos las cuales son: tabla de contadores de asignación y el mapa de bits de asignación.

La tabla contiene los siguientes datos de cada DSME-GTS asignado al nodo: ID de supertrama, ID de ranura, ID de canal (el número de canal físico en modo adaptación de canal y salto de canal en modo desplazamiento de canal), dirección de transmisión o recepción, tipo (GTS, GACK, regular), prioridad (alto o bajo), dirección de nodo, contador de inactividad y calidad del enlace.

De manera inversa, en el mapa de bits de asignación de ranuras se almacena el DSME-GTS que ha sido asignado al nodo y a sus vecinos de hasta un salto. En el modo adaptación de canal el mapa contiene un bit que puede ser 1 o 0 para indicar un par posible (ch, ts), dónde ch es canal físico y ts es el DSME-GTS [17] [14]. En el modo salto de canal el mapa de bits es más pequeño debido a que solo el canal específico es usado en el GTS, de esta forma solo se indica si el GTS está libre o en uso.

La asignación de los DSME-GTS consiste en un apretón de manos de tres pasos que son:

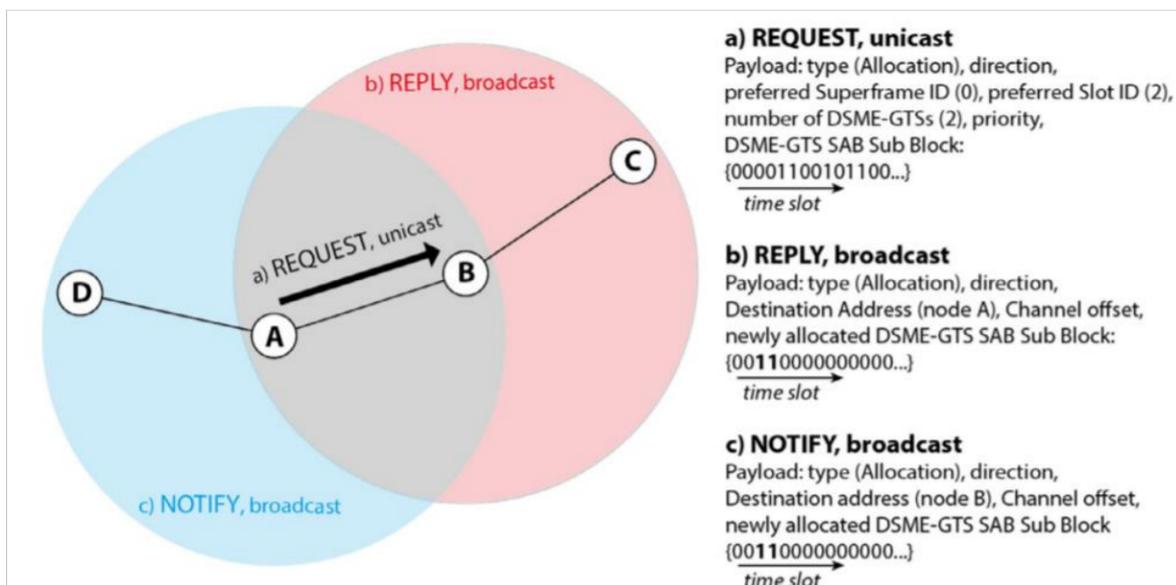
Paso 1, Solicitud (Request). El nodo A transmite un comando (DSME-GTS REQUEST) al nodo B, en esta solicitud se debe especificar: tipo(solicitud), dirección de comunicación (transmisión o recepción), ID de supertrama, ID de ranura para la asignación de DSME-GTS, número de DSME-GTSs solicitados, prioridad de DSME-GTS y un sub bloque DSME-GTS SAB. Este último bloque SAB contiene un mapa de bits que se utiliza para informar al nodo B los intervalos a utilizar en la asignación. Además, existen otros dos campos en la trama de solicitud que indican la longitud y el inicio del sub bloque SAB.

Luego de la transmisión, el nodo A espera un comando de respuesta desde el nodo B durante un periodo de `macMaxFrameTotalWaitTime` símbolos, en caso de que no se reciba una respuesta se considera que la asignación ha fallado.

Paso 2, Respuesta (Replay). Una vez que ha llegado el pedido, el nodo B envía un comando de respuesta a todos los vecinos (Broadcast). El nodo B tiene que decidir que GTS asignar al nodo A y si el modo de adaptación de canal está habilitado también debe escoger el canal a utilizar, en cuanto a los ID de supertrama e ID de ranura se debe tener en cuenta las preferidas del nodo solicitante (nodo A) y en el caso de que no esté disponible se considere la siguiente y así sucesivamente. Lo que internamente hace el nodo B es comparar su mapa de bits con el mapa de bits del nodo A, en esta comparación se busca ranuras comunes que estén libres (marcados con cero) y cuya cantidad sea la solicitada por el nodo A.

Si se encuentran los DSME-GTS compatibles con la asignación de ranuras de ambos nodos, entonces el nodo B actualiza sus dos estructuras de datos e incluye una bandera de éxito en la trama de respuesta, además en esta respuesta se indican las ranuras que han sido asignados recientemente. Para el caso de salto de canal es similar y además se incluye el desplazamiento de canal del nodo B.

Paso 3, Notificación (Notify). Cuando el nodo A recibe la trama de respuesta y la bandera de estado tiene el valor de éxito, se agregan los nuevos DSME-GTS a sus estructuras de datos y transmite una trama a todos los vecinos incluido el nodo B el comando NOTIFY. En la carga útil del comando NOTIFY se envía la dirección del nodo B y las ranuras que se acaban de asignar [17].



**Figura 1.15.** Apretón de manos para asignación de DSME-GTS [13]

El método para evitar duplicación en la asignación consiste en que los nodos vecinos al par A y B cuando reciben una trama de respuesta (Replay) o notificación (Notify) que tenga

el estado en éxito, estos hacen la comparación empiezan comparando que su dirección debe ser diferente a la dirección de la trama de respuesta y luego proceden a verificar que las ranuras asignadas recientemente a los nodos A y B no estén en conflicto con las ranuras propios. Si es así, el nodo vecino envía un comando de solicitud tipo Notificación de Asignación Duplicada hacia el nodo del cual recibió el anterior Replay o Notify. Este comando se utiliza para informar al nodo que su asignación realizada no es válida y debe deshacerse de lo contrario existirá conflicto. Como consecuencia los nodos en cuestión (A y B) actualizan sus mapas de bits y empiezan el proceso de des asignación y asignación nuevamente, los vecinos del nodo A y del nodo B también toman nota de los DSME-GTS asignados.

#### **1.4.2.3 MODO LLDN (low Latency Deterministic Network)**

El modo LLDN está diseñado para redes monosalto y mono canal, específicamente para aplicaciones de automatización industrial, donde una gran cantidad de dispositivos observan y controlan la producción de la fábrica. En este contexto la comunicación inalámbrica representa una alternativa válida con respecto al cableado que es caro lento y engorroso, además, la alternativa inalámbrica proporciona ventajas en situaciones de movilidad y modernización. Algunos de los usos de LLDN son en: robots, grúas, cintas transportadoras, escenarios de carga y logística. Los requisitos para las aplicaciones ya mencionadas son baja latencia y alto determinismo cíclico para lo cual LLDN define un Acceso TDMA Determinista Angular Fino.

LLDN ha sido diseñado solo para topologías estrella, donde los nodos sensores envían datos periódicamente al PAN Coordinator, además, todos los nodos se comunican a través de un solo canal de frecuencia el cual es elegido por el coordinador durante la formación de la red [13] [14].

El acceso al medio inalámbrico se realiza utilizando ranuras de tiempo que forman parte de supertramas y se generan continuamente, un nodo puede acceder durante una porción dedicada de la supertrama de acuerdo con un enfoque TDMA, de lo contrario se pueden configurar grupos de ranuras de tiempo, en los cuales tienen acceso múltiple un grupo de nodos utilizando el protocolo CSMA. Adicionalmente, la codificación DSSS asegura una comunicación altamente confiable, en caso de que el número de nodos sea superior al número de ranuras de tiempo, el estándar propone equipar al coordinador PAN con múltiples transceptores para permitir comunicaciones simultáneas en diferentes canales.

Entre las modificaciones que proporciona LLDN tenemos: reconocimiento de grupo, las ranuras de tiempo pueden ser mucho más cortas a comparación de TSCH, las tramas MAC tienen una cabecera de un octeto, se puede omitir campos de dirección ya que las ranuras de tiempo son dedicadas y van solo al coordinador PAN. Como resultado de esto, se puede reducir el tamaño de paquetes y las ranuras de tiempo, consecuentemente se puede limitar la duración de supertramas y con supertramas cortas las transmisiones de los nodos son más frecuentes con latencias bajas y determinísticas [13].

## **Características de LLDN**

### **Transmisión**

La transmisión en una red LLDN pasa por tres estados antes de que sea operativa, cada estado es anunciado por el coordinador a través de un campo específico en las tramas Beacon. Los tres estados se mencionan a continuación.

1. Descubrimiento (Discovery). Es el primer paso en la configuración de la red, también se utiliza para agregar nuevos nodos a una red ya existente. El procedimiento empieza cuando un nodo quiere unirse a una red, lo que debe hacer es escanear los diferentes canales hasta detectar una trama beacon de un coordinador PAN, luego el nodo informa al coordinador su intención de unirse enviando una respuesta de Discovery. En caso de que el coordinador no reciba ninguna trama de respuesta de Discovery por un periodo de 256 segundos, este pasa a estado de Configuración [13].

2. Configuración (Configuration). Este es el segundo paso durante la configuración de red, en este estado cada nodo que recibe la trama beacon envía al coordinador una trama de estado de configuración. Esta trama especifica los valores de los parámetros de configuración requeridos por el nodo como: las direcciones MAC cortas y completas del nodo, la duración de las ranuras de tiempo requeridas para las aplicaciones, la dirección de comunicación (ascendente o bidireccional) y ranuras de tiempo ya asignados. El coordinador responde con una trama de solicitud de configuración el cual posee nuevos valores de los parámetros de configuración y que el nodo debe utilizar durante el estado en línea.

3. En línea (Online). En este estado los nodos pueden transmitir los datos y lecturas hacia el coordinador en su respectiva ranura de tiempo [13].

### **Estructura de supertrama**

Debido a los requisitos de las aplicaciones de baja latencia son estrictos, LLDN maneja una estructura de supertrama mínima que es de duración fija y está dividida en ranuras de tiempo. Existen varios tipos de ranuras de tiempo que se distinguen según su función.

1. Intervalos de tiempo Beacon. Este intervalo está reservado para el coordinador, se encuentra al inicio de cada supertrama. El coordinador envía tramas beacon que sirven para indicar el inicio de una supertrama, mantener sincronizados los nodos y llevar información para el correcto funcionamiento de la red.

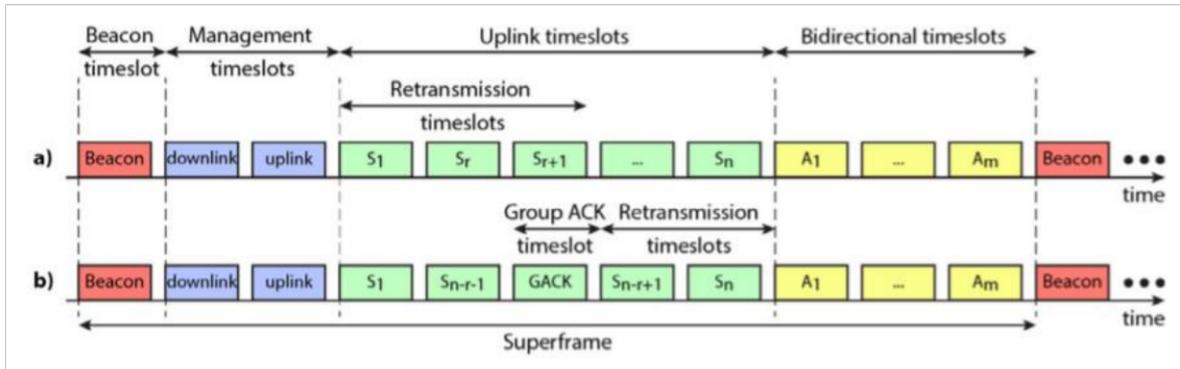
2. Intervalos de tiempo de Gestión. Existen dos intervalos de tiempo de gestión uno es ascendente y otro es descendente que permiten a los nodos recibir y transmitir comandos de gestión desde y hacia el Pan coordinador respectivamente. Los intervalos de gestión se implementan como intervalos de acceso de grupo compartido y su tamaño se especifica en las tramas beacon que envía el coordinador.

3. Intervalos de tiempo de enlace ascendente. Están reservados para la comunicación unidireccional de datos hacia el coordinador, cada nodo es asignado a un intervalo particular es decir es una ranura dedicada durante la fase de configuración, sin embargo, se pueden asignar más de un nodo a una ranura dando como resultado un intervalo de grupo compartido.

4. Intervalos de tiempo Bidireccionales. Están ubicados al final de la supertrama y se utilizan para la transmisión de datos del nodo al coordinador y viceversa del coordinador al nodo, la trama beacon establece la dirección de la comunicación en el intervalo bidireccional a través del bit de dirección de transmisión.

La estructura de la supertrama cambia según el estado de la transmisión, en los estados de Discovery y Configuration no se permite ranuras de tiempo bidireccionales o de enlace ascendente (Uplink), por lo tanto, la supertrama contiene solo intervalos de tiempo beacon e intervalos de tiempo de gestión.

En el estado online los intervalos de gestión son opcionales, su presencia y duración son indicadas en las tramas beacon y en tramas de solicitud de configuración. Además, en el estado en línea la supertrama contiene ranuras de tiempo de enlace ascendente y bidireccionales.



**Figura 1.16.** Supertrama en estado online: sin ACK de grupo (a) y con ACK de grupo [13]

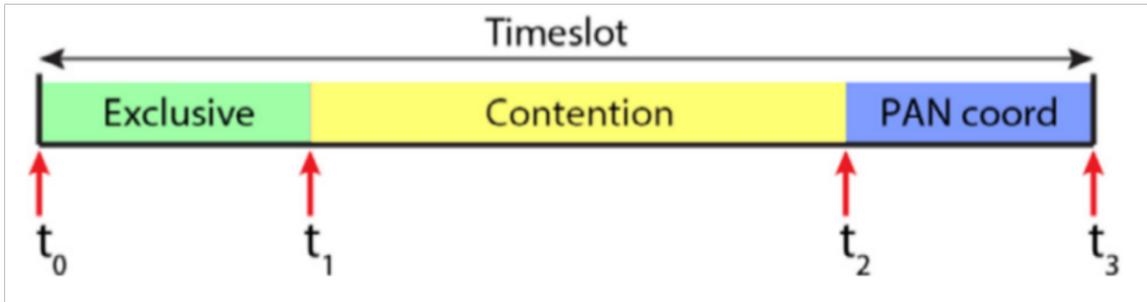
Los nodos pueden enviar sus tramas de datos durante las ranuras de tiempo y dichas ranuras tienen la misma longitud tanto para bidireccionales como ascendentes. La longitud depende del tamaño de carga útil que necesite la aplicación y de las cabeceras introducidas en las capas MAC y física, además de los espacios entre tramas (Interframe Space - IFS). Debemos tener en cuenta que si el tamaño de las ranuras de tiempo aumenta consecuentemente aumentara el tamaño de supertrama y la latencia también incrementara, otra opción es, si el tamaño de las ranuras de tiempo aumenta entonces la cantidad de ranuras por intervalo en la supertrama disminuye al igual que los nodos que pueden transmitir en el intervalo Uplink.

LLDN proporciona la función de ACK grupal que trabaja de la siguiente manera: las tramas beacon contienen un mapa de bits de las ranuras de tiempo ascendente de la supertrama anterior que indican si la transmisión fue exitosa o fallida, en caso de que la transmisión no tuviera éxito, se pueden reservar ranuras de tiempo ascendente para hacer retransmisión, otra alternativa es enviar tramas de datos y luego una trama con el mapa de bits de ACK de grupo de las tramas enviadas recientemente, entonces las ranuras siguientes se utilizarán para retransmisiones en caso de transmisiones fallidas. Esta es la forma en que LLDN ofrece retransmitir paquetes fallidos dentro de la misma supertrama [13].

La función de ACK de grupo es también aplicada en ranuras de tiempo bidireccionales cuando son transmisiones ascendentes, para lograr esto el coordinador luego de enviar datos en una transmisión bidireccional establece la dirección de la siguiente transmisión en ascendente para la siguiente supertrama, a fin de recibir ACKs de la información que envió. Por el contrario, en el caso de una transmisión descendente el nodo envía ACK del paquete recibido en la siguiente supertrama.

### Acceso al canal dentro de las ranuras de tiempo

Para regular el acceso al medio inalámbrico, cada ranura de tiempos se divide en tres partes que son: exclusivo, contención y coordinador PAN.



**Figura 1.17.** División de ranura de tiempo [13]

Exclusivo ( $t_0 - t_1$ ). Como se menciona anteriormente, durante la fase de configuración se puede asignar un intervalo de tiempo a un nodo. Por lo tanto, cuando empieza la ranura de tiempo el nodo tiene acceso exclusivo desde  $t_0$  hasta  $t_1$  y puede transmitir directamente.

Contención ( $t_1 - t_2$ ). En caso de que el nodo propietario no use toda la ranura de tiempo, la parte sobrante puede ser utilizada por otros nodos, específicamente desde  $t_1$  hasta  $t_2$  cualquier nodo a excepción del coordinador puede utilizar esta parte de la ranura. Para ello, el coordinador al notar que el nodo propietario no va a utilizar todo la ranura de tiempo, difunde (broadcast) una trama de permiso para enviar (Clear to Send - CTS) de grupo compartido, Luego los nodos que estén interesados transmiten una trama de pedido para enviar ( Request to Send - RTS ) al coordinador y esperan que les llegue un CTS antes de iniciar la transmisión de datos, ya que muchos nodos compiten para acceder al canal las tramas de datos y comandos deben enviarse utilizando una versión simplificada de CSMA-CA, esta versión simplificada permite solo una etapa de retroceso, es decir si falla la evaluación de canal disponible (CCA), el paquete es desechado inmediatamente.

Coordinador PAN ( $t_2 - t_3$ ). Este intervalo de tiempo es utilizado por el coordinador a menos que haya sido utilizado por otro nodo.

Los intervalos de tiempo pueden variar al modificar los valores de  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ . Por ejemplo, se puede reservar el intervalo de tiempo para un solo nodo (ranura dedicada) o para crear las ranuras de tiempo de grupo compartido.

#### **1.4.2.4 Modo AMCA (Asynchronous Multi-Channel Adaptation)**

Este modo de operación está diseñado para redes de gran tamaño como: control de proceso, monitoreo de infraestructuras y servicio público inteligente. En redes AMCA cada dispositivo selecciona el canal con la mejor calidad de enlace el cual será su canal de escucha, si un dispositivo quiere transmitir información debe cambiar al canal del receptor, enviar la información y luego volver a su canal para esperar el respectivo ACK.

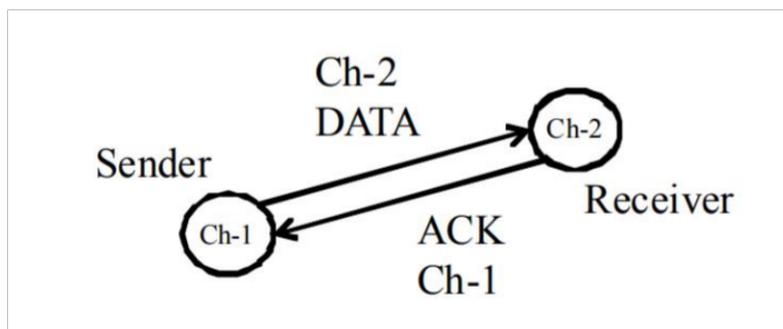
En el protocolo 802.15.4 el enfoque de un solo canal causa que no todos los dispositivos se puedan conectar en la red, si la variación de canal es muy grande puede ocurrir asimetría de canal entre dos nodos vecinos. La solución para manejar estos casos es Adaptación multicanal Asíncrona la cual está orientada a implementaciones grandes, estas redes requieren adaptaciones de enlace para comunicarse entre varios dispositivos sin comprometer el rendimiento.

Se especifican dos tipos de adaptación multicanal: adaptación multicanal sincrónica y adaptación multicanal asíncrona, la adaptación multicanal sincrónica utiliza tramas beacon y es manejada por DSME-GTS, mientras que la adaptación multicanal asíncrona utiliza un modo de operación sin baliza, puesto que no hay sincronismo, los nodos permanecen activos durante toda su vida útil resultando en disipación considerable de energía [14].

#### **Características de AMCA**

##### **Comunicación basada en receptor**

Este tipo de comunicación se utiliza en casos en los que no exista un canal común entre dos dispositivos, de modo que no puedan comunicarse a pesar de que hay muchos canales disponibles, a continuación, se describe como actúa este método. Cada nodo selecciona su canal de escucha designado (`macDesignatedListeningChannel`) y se mantiene escuchándolo, cuando otro nodo (emisor) quiere comunicarse con el primero (receptor), este emisor debe cambiarse al canal de escucha designado del nodo receptor y transmitir una trama de datos, luego el nodo emisor vuelve a su canal de escucha designado y continúa escuchando. Una vez que en el nodo receptor ha recibido la trama de datos, ahora el receptor cambia al canal designado del emisor para enviar un ACK en caso de ser solicitado y de igual manera que el emisor, una vez se haya realizado la transmisión este vuelve a su canal designado y continúa escuchando.



**Figura 1.18.** Comunicación basada en receptor [14]

### **Escaneo activo multicanal asimétrico**

El escaneo activo multicanal asimétrico permite que el nodo detecte el canal de escucha designado de cada coordinador o detecte el mejor canal para convertirlo en propio. Para realizar una exploración activa multicanal en un conjunto de canales, el nodo realiza un procedimiento para cada canal haciendo una solicitud con la primitiva `MLMESCAN.request` y el parámetro `ScanType` establecido en `0x04` [14]. Para enviar esta solicitud, el nodo debe configurar los registros `phyCurrentChannel` y el `phyCurrentPage`, luego de esta configuración se envía el comando `AMCA`, una vez que la transmisión es exitosa el nodo activa su receptor por un periodo de tiempo, durante este lapso de tiempo el nodo rechazará todas las tramas que no sean beacon y guarda la información de las beacons que le llegan en una estructura de descripción PAN, luego pasa al siguiente canal y repite el proceso. Este procedimiento se repite hasta pasar dos veces por cada canal y así garantizar la recepción exitosa de la información de las beacons.

Dentro de la información recibida en las tramas beacon se ubica el indicador `linkqualityscan`, el cual en caso de ser falso causa que el nodo pueda detenerse después de recibir dicha trama beacon y decidir que el canal actual sea su canal de escucha designado. Por el contrario, si el `linkqualityscan` es verdadero, el nodo toma una decisión sobre su canal de escucha comparando el indicador de calidad de línea (`Link Quality Indicator - LQI`) o el indicador de intensidad de la señal de recepción (`Received Strength Signal Indicator - RSSI`) de las beacons recibidas y en base a estas comparaciones escoge o no un nuevo canal de escucha.

El nodo coordinador al recibir el comando de solicitud `AMCA-Beacon`, transmite una trama beacon sobre el conjunto de canales que se especificó en el comando recibido, luego al

tener éxito en la transmisión en un canal, espera un periodo de tiempo y cambia al siguiente canal, este procedimiento se repetirá en todos los canales especificados en el comando de solicitud AMCA-Beacon recibido.

### **Mecanismo multi-channel hello**

Es un mecanismo que permite al nodo anunciar su canal de escucha designado a los nodos vecinos de hasta un salto.

Luego de realizar con éxito la exploración activa asimétrica y la asociación, el nodo transmitirá un comando de saludo multicanal en todos los canales utilizados durante la exploración, también puede solicitar un saludo multicanal de los vecinos configurando el saludo en el campo hello request con el valor de uno, cuando los vecinos reciben este comando modificado, estos se cambian al canal del nodo solicitante y envían un saludo con el campo hello request en cero [14].

### **Sondeo de canal (Channel Probe)**

El sondeo de canal permite explorar otros canales y cambiar a un canal mejor, después de conseguir un mejor canal se sigue el procedimiento mencionado en el mecanismo multi-channel hello para notificarles a los vecinos de un salto sobre el nuevo canal. Además, ya que este mecanismo es de handshaking permite comprobar el estado de su canal.

Para iniciar el sondeo de un canal específico se utiliza la primitiva MLME-SCAN.request con el parámetro ScanType establecido en 0x05 [14]. A continuación, el nodo (emisor) envía un comando de solicitud de sondeo a uno de sus vecinos utilizando el canal designado del nodo vecino (receptor), el receptor al recibir el comando envía una trama de respuesta de sondeo ahora utilizando el canal designado del emisor. Si el emisor recibe una respuesta entonces revisa el LQI y RSSI en la trama receptada para luego tomar la decisión de cambiar o no de canal designado [14]. Si el emisor no recibe del receptor una respuesta a su solicitud de sondeo entonces determina que la calidad del canal es mala.

#### **1.4.2.5 Modo BLINK (Radio Frequency Identification Blink)**

El modo blink fue diseñado para identificación de objetos o personas, seguimiento y localización, en este modo se proporciona un método para que el nodo comunique su ID (dirección de origen EUI-64) y una ID alternativa en el payload, su principal característica es que se basa en una trama multipropósito la cual consta de campos de cabecera necesarios para un correcto funcionamiento, dentro de estas tramas se envía información propia y de otros nodos, todo sin asociación previa y sin la utilización de ACKs, la trama también

conocida como trama blink puede ser utilizada por nodos que realicen solo transmisión y que coexisten dentro de la red con protocolo Aloha.

Los nodos que no estén interesados en aceptar tramas multipropósito blink pueden rechazarlas para que de esta forma no se sobrecargue la capa MAC o capas superiores con tráfico innecesario. En cuanto a comandos para la capa MAC no hay especificación para el modo BLINK.

### Características de BLINK

#### Trama Blink Multipropósito

La trama blink es de transmisión periódica que ha sido diseñada para tener un tamaño lo más pequeño posible, de esta manera la cantidad de energía es menor y consecuentemente se consigue la máxima duración de la batería. Además, debido a que está basada en IE es bastante flexible y extensible permitiendo realizar varias operaciones MAC, otra característica es que puede acomodar los nuevos requisitos MAC manteniendo compatibilidad con versiones anteriores.

La transmisión y recepción se controlan y señaliza mediante primitivas MCPS-DATA, el formato de la trama blink multipropósito consta de una cabecera, una carga útil y una secuencia de verificación de trama [14]. Al ser una trama multipropósito tiene varias funciones que podemos observar con más detalle en tablas en el anexo A.

<b>Octets: 1/2</b>	<b>0/1</b>	<b>0/2</b>	<b>0/2/8</b>	<b>0/5/6/10/14</b>	<b>variable</b>	<b>2</b>
Frame Control	Seq Number	Dest. PAN ID	Src address	Aux Sec	payload	FCS

**Figura 1.19.** trama multipropósito BLINK [14]

Normalmente la cabecera MHR contiene un campo de control de trama, el campo de numero de secuencia y el campo de dirección de origen. Sin embargo, existen otros campos que se pueden utilizar según sea la necesidad de la aplicación.

El campo de control de trama debe contener un valor que indique que es una trama multipropósito, para modificar los campos de dirección de origen y destino lo hacemos en el campo control de trama, en caso de que esté presente el campo de ID de PAN destino entonces se necesitan dos octetos para el campo de control de trama y en dicho campo debe estar el identificador PAN del nodo receptor de la multitrama.

Si se utiliza protección para la trama, se habilita el campo de seguridad y también se necesita un control de trama de dos octetos, normalmente el campo de número de secuencia está siempre presente, pero si se lo quiere suprimir al igual que en el caso anterior se necesita un campo de control de trama de dos octetos.

El campo de dirección fuente en caso de que esté presente deberá contener la dirección extendida del nodo que originó la trama blink. Los campos de identificador PAN de destino y dirección fuente son anunciados en el campo control de trama de allí su aumento de uno a dos octetos.

## **2 METODOLOGÍA**

Debido al enfoque cuantitativo que se escogió en la realización de este estudio, se decidió establecer una secuencia para alcanzar los distintos objetivos, la cual consiste en recopilar información referente al protocolo 802.15.4e, ordenar la información redundante y la importante, identificar diferencias relevantes, comparar de protocolos a nivel MAC y modos de acceso, investigar plataformas de hardware y software que permitan realizar simulaciones o implementaciones de redes que utilicen el protocolo en estudio. El orden debe ser riguroso y a la vez permitir redefinir la secuencia planteada [18] [19].

Basándonos en el método descriptivo se procede a dar una explicación breve de las diferencias que tienen los protocolos 802.15.4 y 802.15.4e. Posteriormente luego de identificar las diferencias se procede a realizar una comparación la cual se puede visualizar en tablas a manera de resumen de la información recopilada con respecto a los modos de operación de la MAC. La idea es exponer con el mayor rigor metodológico, información sobre el tema de estudio [20] [21].

Ya que en este componente se desarrolla un estudio del protocolo 802.15.4e, se aplicó la técnica de recopilación documental y bibliográfica [21] [20], se accedió a libros, manuales, proyectos de titulación, artículos, papers y publicaciones en páginas de internet, que

contengan información referente del protocolo en cuestión. Toda la información será procesada y analizada. Además, se investigó información de proyectos que sugieren y desarrollan implementación o simulación de redes PAN utilizando características del protocolo, en algunos casos mejorándolas o adaptándolas para satisfacer soluciones específicas.

La técnica de análisis de información consiste en leer repetidamente la información ya organizada, identificar los documentos principales [23] [22], así como, los artículos relacionados directamente con las ideas más importantes. El estudio de los documentos importantes me permite realizar un análisis cuantitativo y posteriormente elaborar conclusiones.

## **2.1 Diferencias entre protocolos 802.15.4 y 802.15.4e**

### **2.1.1 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo TSCH**

#### **Cambios en Acceso al canal**

Para el protocolo 802.15.4 el acceso que maneja es el CSMA/CA y ranuras de tiempo garantizadas, por otro lado, en la enmienda 802.15.4e se usa ranuras de tiempo y saltos de canal, para el caso de ranuras compartidas se utiliza una modificación que es llamada TSCH CSMA/CA.

El algoritmo CSMA/CA tiene varias deficiencias que actualmente no serían aceptadas para aplicaciones que requieren retraso bajo o determinista.

**Retraso ilimitado.** En 802.15.4 el protocolo CSMA-CA en los dos casos de habilitación y deshabilitación de beacon (modos BE y NBE) no puede garantizar un límite en el retraso para que lleguen los datos a su destino por la naturaleza del mismo protocolo. Entre las razones tenemos:

- La transmisión ocurre solo si el medio inalámbrico se encuentra libre por dos CCA
- Para mejorar la confiabilidad se incluye mecanismos de retransmisión, por este motivo en el lado del nodo destino se debe enviar un ACK por cada trama, en el caso de que lleguen tramas dañadas o no llegue nada, no se enviará ACK. Por otro lado, si el remitente no recibe ACK dentro en un periodo de tiempo se hacen varias retransmisiones y solo al llegar al máximo de intentos, la trama se rechaza.

**Confiabilidad limitada en la comunicación.** La tasa de entrega de datos es muy baja incluso si el número de nodos no es grande, esto se debe a que el acceso es aleatorio por

los periodos de espera y por la introducción de tramas beacon en el caso del modo BE. Es similar para el modo NBE si tomamos en cuenta los casos en los que una gran cantidad de nodos comienzan a transmitir simultáneamente como sucede en aplicaciones controladas por eventos (monitoreo de temperatura, movimiento entre otros). Además de la aleatoriedad debemos añadir que el retraso juega un papel importante en la cantidad de información transmitida.

**Falta de protección contra interferencias / desvanecimientos.** Las interferencias y el desvaneciendo por trayectorias múltiples son comunes especialmente en escenarios donde se espera redes de sensores o actuadores, pero el inconveniente es que el protocolo 802.15.4 toma un enfoque de un solo canal, al trabajar en un solo canal está sujeto a inestabilidades frecuentes y un posible colapso, por este motivo no es apta para aplicaciones críticas (aplicaciones industriales, atención médica)

### **Diferencias en Acceso al canal en TSCH**

Al manejar la versión TSCH CSMA – CA, podemos notar varios cambios a comparación del protocolo normal.

Lo que hace el nuevo TSCH CSMA-CA no es evitar que se produzcan colisiones sino actuar una vez que estas hayan ocurrido para que no vuelvan a ocurrir, entre las características que los diferencia tenemos:

- La unidad de Backoff es 320uS en 802.15.4, en TSCH el valor es de una ranura compartida, al ser una ranura compartida se garantiza que existirá colisión solo si otros nodos acceden a la misma ranura.
- En el protocolo 802.15.4 el CCA se utilizaba para chequear el estado del canal antes de realizar una transmisión, la idea es evitar una colisión con un paquete que ya se está transmitiendo. En TSCH al estar todos los nodos sincronizados sucede que no hay transmisiones cuando se realiza un CCA, ya que ahora el objetivo es detectar interferencia que si es muy fuerte se debe evitar transmitir paquetes. Además, el uso de CCA es opcional.
- Para disminuir interferencias o desvanecimientos TSCH utiliza el salto de canales, existen 16 canales numerados de cero a quince, normalmente hay menos ya que algunos son enviados a una lista negra por su baja calidad

### **2.1.2 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo DSME**

Hay varios cambios que se enlistan a continuación:

**Diferencia en Multisupertrama.** En el protocolo 802.15.4 la supertrama consta de tres partes que son CAP, CFP e Inactive period, esta distribución se la tomo en cuenta para dispositivos con poca capacidad de procesamiento y restricción en energía.

La multisupertrama está compuesta de varias supertramas, los periodos CAP y CFP son parecidos, ya que las tramas son más grandes, también aumenta el número de GTS debido a que existen más canales y consecuentemente se traduce en mayor capacidad para varios nodos.

El protocolo 802.15.4 emplea el modo sleep para ahorrar energía, pero a la vez aumenta el retraso, DSME utiliza el mecanismo de reducción de CAP, ya que en este periodo se sigue utilizando CSMA-CA lo cual representa consumo de energía por la contienda que se realiza en este periodo. Este mecanismo de reducción hace que solo la primera supertrama sea CAP y en las siguientes supertramas tengan 15 DSME-GTS.

**Enhanced beacon.** En el protocolo 802.15.4 las tramas beacon llevan información de sincronismo y control, además de delimitar las supertramas.

En el caso de DSME, la trama beacon lleva información de identificación, reducción de CAP, diversidad de canal, etc. La trama beacon puede experimentar colisiones con otros dispositivos que estén fuera de la red, para evitar eso DSME dispone de la opción Beacon Diferido el cual consiste en chequear el canal con un CCA antes de transmitir la trama beacon

### **Diversidad de canales**

El protocolo 802.15.4 trabaja en un solo canal mientras tanto en DSME se emplea la adaptación de canal mediante la cual los nodos se asignan un canal durante la asignación DSME-GTS y luego transmiten información durante su GTS.

Salto de canal. Los nodos cambian de canal siguiendo una secuencia predefinida que es decidida por el coordinador, para la transmisión de información el emisor debe saltar a la canal del receptor.

ACK de grupo. Una trama contiene los ACK de tramas de datos recibidas anteriormente para lo cual el coordinador asigna dos DSME-GTS que son GACK1 y GACK2, en el protocolo 802.15.4 se trabaja con ACK normal.

### **2.1.3 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo LLDN**

Como se mencionó anteriormente 802.15.4 trabaja con CSMA-CA y ranuras de tiempo asignadas, por otro lado, LLDN define TDMA determinista angular fino para cumplir con requerimientos de baja latencia y alto determinismo cíclico. Sin embargo, se pueden configurar la red para que en ciertos intervalos de tiempo los nodos puedan acceder utilizando el protocolo CSMA. Los datos son enviados solo al PAN coordinator, por lo cual se admite solo topología estrella y se puede omitir campos de dirección en la cabecera, además, las tramas son más cortas que en TSCH.

**Transmisión.** En LLDN, para la configuración de una red se debe pasar por tres etapas que son: Discovery, Configuration y Online. En estas etapas se añaden nuevos nodos, se establecen parámetros y luego empiezan con la transmisión de datos.

#### **La supertrama**

En 802.15.4 no se manejan varios tipos de ranuras de tiempo en la supertrama, por otro lado, la estructura de la supertrama en LLDN es de duración fija y de tamaño mínimo que permite cumplir con baja latencia, además tenemos varios tipos de ranuras de tiempo: ranuras de baliza, ranuras de gestión, ranuras de enlace ascendente y ranuras bidireccionales. La estructura de la supertrama va cambiando dependiendo de los estados en los que este la configuración de la red. Se maneja el concepto de ACK de grupo que es informado a la red a través de tramas beacon. En 802.15.4 durante el CAP y el CFP las ranuras son las mismas solo cambia el método de acceso.

#### **División de ranura de tiempo**

Las ranuras se dividen entre partes que son: exclusive, contention y PAN coordinator. Durante el periodo exclusive solo el nodo al que ha sido asignado la ranura puede transmitir, en el periodo contention puede transmitir cualquier otro nodo a excepción del coordinador siempre y cuando el nodo propietario no haga uso de toda la ranura, en el periodo coordinador solo puede ser utilizado por el nodo coordinador de igual forma tiene preferencia el nodo propietario, en el protocolo 802.15.4 no se especifica división de ranura de tiempo como en LLDN.

### **2.1.4 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo AMCA**

El modo AMCA, al no trabajar con tramas beacon carece de sincronismo, esto causa que los nodos de la red deban estar activos permanentemente y como consecuencia hay un consumo de energía constante. Cada nodo selecciona su canal de escucha y se mantiene

escuchándolo. Al ser el modo AMCA una adaptación asincrónica, presenta varias características que la diferencian de la MAC 802.15.4.

### **Comunicación basada en receptor**

Para que un nodo emisor pueda transmitir información a otro receptor en este tipo de comunicación, el emisor debe cambiarse al canal escucha del receptor y esperar luego en su canal de escucha la respuesta proveniente del receptor. Por el lado de 802.15.4 la comunicación la hace solo a través de las ranuras de tiempo y es sincrónica. En el caso del modo NBE al no trabajar con tramas beacon, todas las acciones de control las hacen las capas superiores.

### **Mecanismo de escaneo multicanal**

El mecanismo se inicia utilizando la primitiva MLMESCAN.request y modificando registros para luego enviar el comando AMCA, a continuación, guarda la información de las tramas beacon que le llegan en una estructura de descripción PAN, este proceso se repite en cada canal dos veces. Durante este mecanismo, si el nodo encuentra un canal desocupado y es mejor que su canal actual, decide cambiar de canal escucha. En el caso de 802.15.4 como la red esta sincronizada, toda la información de nodos vecinos y coordinadores y sus respectivas ranuras de tiempo se las obtiene a través de tramas beacon.

### **Mecanismo de Hello y sondeo de canal**

El procedimiento Hello permite anunciar el canal de escucha designando a los nodos vecinos de hasta un salto y el sondeo de canal permite buscar el mejor canal y luego de encontrarlo se debe informar a los vecinos de la nueva asignación. En 802.15.4 como se mencionó anteriormente se emplea un solo canal, además de la contienda en el periodo CAP y las ranuras asignadas en CFP.

#### **2.1.5 Diferencias entre MAC 802.15.4 y modo BLINK**

El modo BLINK trabaja con una trama multipropósito, el acceso al canal lo realiza con protocolo Aloha y para la transmisión no es necesaria asociación, La razón por la que no se realiza asociación es porque no hay especificación de comandos. En el protocolo 802.15.4 existen más especificaciones para el acceso al medio y se trabaja con la supertrama.

La trama multipropósito es pequeña con el objetivo de incrementar la duración de la batería, en cuanto al control y señalización de tramas recae en primitivas MCPS-DATA. La estructura de la trama consta de cabecera, payload y un campo de secuencia de

verificación de trama. En 802.15.4 se plantea el uso del modo sleep para un ahorro de energía, es necesaria la asociación y el control es a través de tramas beacons.

Dependiendo de las necesidades de las aplicaciones es necesario añadir campos en la cabecera, entre las que tenemos incrementar tamaño del campo control para incluir campos como: Id de destino, Aux Sec (seguridad), eliminar campo secuencia.

## 2.2 Comparación de características de protocolo 802.15.4e

Comparación entre MAC 802.15.4 y Modo TSCH

**Tabla2.1.** Comparación MAC 802.15.4 y TSCH

PARAMETRO A COMPARAR	MAC 802.15.4	TSCH 802.15.4e
Acceso al canal	CSMA-CA y ranuras garantizados	Ranuras dedicadas y TSCH CSMA-CA para las ranuras compartidas
Organización temporal	Supertrama	Slotframe
Gestión de trama	CAP (contienda), CFP (GTSs) y periodo inactivo	Ranuras de tiempo
Ahorro de energía	Nodos pasan a sleep en periodo inactivo	Dentro de una ranura de tiempo existen periodos en los que se apaga el radio
Topología	Estrella, Peer-to Peer	Estrella, árbol, malla.
Sincronización	A través del beacon.	Basado en trama Basado en ACK
Comportamiento en alto tráfico	Aumenta la latencia durante el CAP	No aumenta latencia debido al sincronismo y multicanal
Mecanismo multicanal	1 canal	Channel Hopping
Tiempo antes de transmisión	2 CCA	1 CCA
Tiempo antes de retransmisión	Backoff de un tiempo aleatorio	Backoff espera el siguiente enlace.

Comparación entre MAC 802.15.4 y Modo DSME

**Tabla2.2.** Comparación MAC 802.15.4 y DSME

PARAMETRO A COMPARAR	MAC 802.15.4	DSME 802.15.4e
Acceso al canal	CSMA-CA y ranuras garantizados	CSMA-CA y ranuras de tiempo dedicadas (DSME GTS)
Organización temporal	Supertrama	Multisupertrama

<b>Gestión de trama</b>	CAP (contienda), CFP (GTSs) y periodo inactivo	CAP (CSME-CA), CFP (DSME GTS)
<b>Ahorro de energía</b>	Nodos pasan a sleep en periodo inactivo	Los nodos apagan el radio por instantes hasta que le toque su GTS, implementación de ACK grupal, reducción del CAP
<b>Topología</b>	Estrella, Peer-to Peer	Malla, Multisalto
<b>Sincronización</b>	A través del beacon.	A través de Enhanced Beacon
<b>Comportamiento en alto tráfico</b>	Aumenta la latencia durante el CAP	No aumenta latencia debido al multicanal
<b>Mecanismo multicanal</b>	1 canal	Channel Hopping Channel adaptation
<b>Confirmación</b>	ACK	ACK de grupo (GACK1 y GACK2)
<b>Comportamiento ante cambios en la red</b>	No tiene	Gestión de DSME GTSs

Comparación entre MAC 802.15.4 y Modo LLDN

**Tabla2.2.** Comparación MAC 802.15.4 y LLDN

<b>PARAMETRO A COMPARAR</b>	<b>MAC 802.15.4</b>	<b>LLDN 802.15.4e</b>
<b>Acceso al canal</b>	CSMA-CA y ranuras garantizados	TDMA determinística angular fino y CSMA-CA en ranuras compartidos
<b>Organización temporal</b>	Supertrama	Supertrama mínima
<b>Gestión de trama</b>	CAP (contienda), CFP (GTSs) y periodo inactivo	Ranuras de Baliza, Gestión, enlace ascendente y Bidireccionales
<b>Ahorro de energía</b>	Nodos pasan a sleep en periodo inactivo	Implementación de ACK grupal, reducción de tamaño de paquetes
<b>Topología</b>	Estrella, Peer-to Peer	Estrella
<b>Sincronización</b>	A través del beacon.	A través de Enhanced Beacon
<b>Comportamiento en alto tráfico</b>	Aumenta la latencia durante el CAP	Se mantiene latencias bajas aumentando la frecuencia de las transmisiones para esto se disminuye la duración de supertramas
<b>Mecanismo multicanal</b>	1 canal	1 canal, recomendación de incremento transreceptores
<b>Confirmación</b>	ACK	ACK de grupo

Comparación entre MAC 802.15.4 y Modo AMCA

**Tabla2.3.** Comparación MAC 802.15.4 y AMCA

PARAMETRO A COMPARAR	MAC 802.15.4	AMCA 802.15.4e
Acceso al canal	CSMA-CA y ranuras garantizados	Cada nodo selecciona su propio canal de escucha
Organización temporal	Supertrama	Trama MAC 802.15.4e
Ahorro de energía	Nodos pasan a sleep en periodo inactivo	No tiene, los nodos están activos todo el tiempo.
Topología	Estrella, Peer-to Peer	Estrella
Sincronización	A través del beacon.	Es asincrónica
Comportamiento en alto tráfico	Aumenta la latencia durante el CAP	Se mantiene latencias bajas aumentando la frecuencia de las transmisiones para esto se disminuyendo duración de supertramas
Mecanismo multicanal	1 canal	Comunicación basada en receptor

Comparación entre MAC 802.15.4 y Modo BLINK

**Tabla2.3.** Comparación MAC 802.15.4 y AMCA

PARAMETRO A COMPARAR	MAC 802.15.4	BLINK 802.15.4e
Acceso al canal	CSMA-CA y ranuras garantizados	Aloha
Organización temporal	Supertrama	Trama multipropósito
Ahorro de energía	Nodos pasan a sleep en periodo inactivo	Reducción en el tamaño de trama, no hay asociación previa ni ACK

## 2.3 Kits de desarrollo de redes 802.15.4e

Para la selección de hardware se tuvo en cuenta plataformas que han sido desarrolladas exclusivamente para trabajar con 802.15.4e o plataformas que mediante parches de programación o modificaciones en el sistema operativo han logrado trabajar con el protocolo en estudio.

### OpenMote B

Es un dispositivo de bajo consumo que se utiliza ampliamente en aplicaciones IoT, cuenta con el respaldo de implementación Open Source 6TiSCG en software como Contiki y OpenWSN [24].

Características principales:

Ti CC22538 SoC (512kb Flash 32kb RAM)

Controlador Atmel AT86RF215, Radio (868/915 MH)

Soporta protocolo 802.15.4e y modulaciones de 802.15.4g

Operación simultanea de radio doble.

Esta plataforma fue utilizada un proyecto de titulación de maestría en ingeniería de telecomunicación en el 2018 en Universidad Abierta de Cataluña y cuyo autor es Javier López, el proyecto tiene como objetivo implementar MQTT-S sobre IEEE802.15.4e para lo cual utiliza el sistema operativo OpenWSN y la herramienta Scons, mediante esta se configuran Scripts de compilación (SConscript) y se añaden librerías mediante un proceso descrito en [25].



**Figura 2.1.** Plataforma OpenMote B [26]

### **OpenMote-cc2538**

Es el OpenMote de primera generación del tipo SoC (System on a Chip), su núcleo es el CC2538 desarrollado por Texas Instruments, cuenta con varios periféricos (GPIO, ADC, I2C, UART) [27].

Características principales

Controlador Cortex-M3

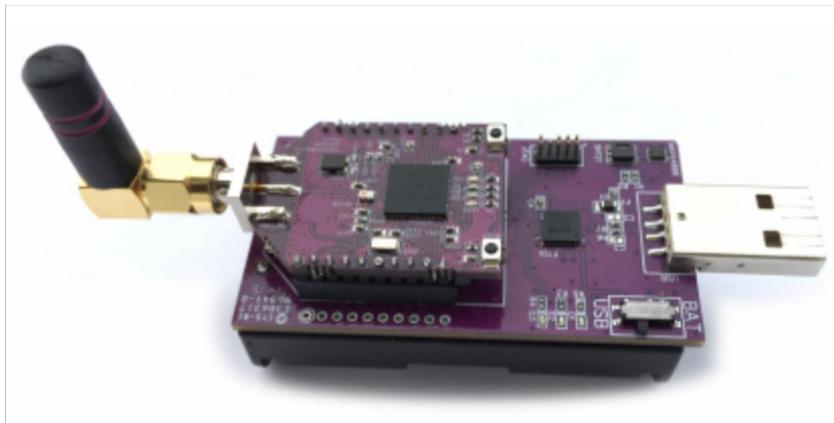
RAM de 32 kB y 512 Kb de flash

Radio (2.4 GHz)

Compatible con estándar IEEE 802.15.4

Esta plataforma es más conocida por implementar 802.15.4e, por ejemplo, en un proyecto de titulación de maestría de la Universidad Abierta de Cataluña en el año 2015 y cuyo autor es Albert Creixell Antolín, se creó una librería que permite a la plataforma implementar TSCH, esta librería modificara el firmware y los pasos a seguir están en [25] [26].

En otro proyecto de maestría también en la Universidad Abierta de Cataluña, se implementa el mecanismo de CSL de 802.15.4e para lo cual se suprime el modo TSCH y se modifica los ficheros IEEE802154EcsI.c y IEEE802154EcsI.h, el procedimiento se detalla en [8].



**Figura 2.2.** Plataforma OpenMote – cc2538 [25]

Existen otras plataformas que han sido desarrolladas para el estándar 802.15.4 como Telos B, Zolertia Z1, pero no pueden implementar 802.15.4e. sin embargo en simulación hay más opciones.

## **2.4 Herramientas de simulación de redes 802.15.4e**

Las herramientas de simulación en la mayoría de los casos están incluidas en los sistemas operativos con los que trabajan las diferentes plataformas, pues para ejecutar una simulación además de las capas MAC y Física, en las capas superiores se debe trabajar con una pila de protocolos correspondientes a dichas capas que juegan un papel importante dentro de la simulación de WSN.

A continuación, se muestran simuladores que trabajan con 802.15.4e:

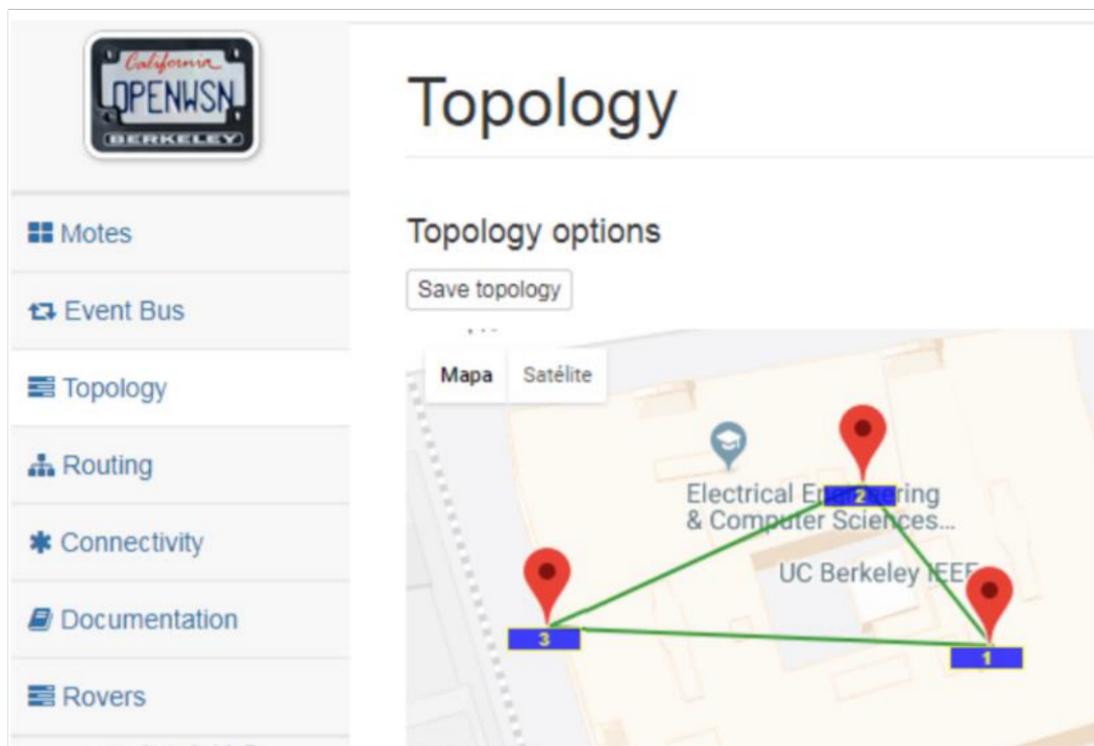
### **OpenWSN**

OpenWSN es un proyecto creado por la universidad California Berkeley, extendido en INRIA y en la Universidad Abierta de Cataluña (UOC) cuyo objetivo es implementar un código abierto basado en open source y una pila de protocolos restringidos para el desarrollo de redes de sensores e internet de las cosas. La raíz de OpenWSN es la capa determinística MAC de 802.15.4e TSCH [16]. Las capas superiores a la MAC se basan en el estándar IETF como por ejemplo la capa de adaptación y gestión IETF 6TiSCH. El stack se complementa con una implementación de 6LoWPAN, RPL y CoAP que permiten al usuario crear redes malladas de ultra baja potencia y de alta disponibilidad que estén completamente conectadas a internet.

OpenVisualizer es un programa escrito en Python y desarrollado por los creadores de OpenWSN en el que se muestra información de los nodos que están activos en la red [28].

OpenSim es la herramienta que simula los motes y en la que podemos cargar el sistema operativo o el firmware modificados de los motes.

Se ha encontrado dos proyectos de titulación de maestría en la Universidad Abierta de Cataluña en los que se han desarrollado Demostradores con tecnología 802.15.4 gracias a OpenWSN, OpenVisualizer y OpenSim. El procedimiento de simulación y configuración del firmware para la simulación de redes 802.15.4e esta descrito en [29] [28].



**Figura2.3.** Simulación de red 802.5.4e TSCH [29]

## **COOJA**

COOJA es un simulador flexible basado en Java, aunque fue diseñado para simular nodos que trabajen con el sistema operativo ContikiOS, también es capaz de simular nodos que implementen otro sistema operativo [24].

En el artículo A Simulative Study of Network Association Delays in IEEE 802.15.4e TSCH Networks publicado en el IEEE y cuyos autores son Lu Wang y Andreas Reinhardt, se informó que se ha logrado simular TSCH de 802.15.4e, lo que se hizo es compilar el código RPL- TSCH en un zolertia Z1 y utilizar una versión parchada del compilador MSPGCCX y así superar las limitaciones de memoria. Los resultados de este estudio se encuentran en [30].

## **NS-3**

Es un simulador basado en eventos discretos, se usa en alto porcentaje en ambientes de educación e investigación de redes móviles ad-hoc. Su implementación consta de un amplio rango de protocolos, está basado en ns que es un software libre y cuenta con dos versiones ns-2 y ns-3, que son incompatibles.

La infraestructura de ns-3 permite el desarrollo de modelos de simulación de alto desempeño como, por ejemplo: redes IP, wifi, wimax, LTE y últimamente en la simulación de redes WSN.

En el artículo Building an IEEE 802.15.4e TSCH network publicado en el IEEE se evalúa entre dos redes, una 802.15.4 y otra 802.15.4e TSCH, los siguientes parámetros: tiempo para detectar una baliza, intervalo de baliza. Los resultados de esta simulación se pueden observar en [31].

## **OmNet++**

Es una librería de simulación que incluye redes de simulación inalámbrico y cableado, su funcionalidad específica es dar soporte a redes de sensores, redes inalámbricas ad-hoc, protocolos de internet, redes fotónicas, etc. El IDE está basado en eclipse, además, existen extensiones para simulación en tiempo real, emulación de red, bases de datos, entre otras. La distribución es bajo Licencia Pública Académica [32]. La programación de los módulos se hace en lenguaje C++ y para el ensamble de los componentes tenemos otro lenguaje NED [34]. Miembros de la comunidad han desarrollado innumerables modelos de simulación: redes estrella, peer-to-peer, redes ad-hoc, redes vehiculares, redes de malla, WSN, etc.,

En el artículo A Novel IEEE 802.15.4e DSME MAC for Wireless Sensor Networks publicado en la revista Sensors, se propone crear un nuevo modo de acceso al canal partiendo del anterior DSME. Luego de hacer los cambios se hace una comparación por simulación del original 802.15.4e DSME y la nueva propuesta, los parámetros que se miden son: rendimiento, confiabilidad, retraso y consumo de energía. Los resultados de las simulaciones pueden verlas en [33].

### **Opnet**

OPNET Network es una herramienta de simulación de cualquier tipo de red, es un software libre y posee una gran cantidad de escenarios de proyectos, la principal diferencia con otros simuladores es su potencia y versatilidad, puede simular comportamientos y rendimientos de cualquier tipo de red para lo cual se proporciona modelos preconstruidos de protocolos y dispositivos, se puede crear diferentes topologías de red [34]. Un aspecto importante es que los protocolos y dispositivos proporcionados es fijo, es decir, no se pueden modificar.

En el artículo Modeling and Simulation of Energy Efficient Enhancements for IEEE 802.15.4e DSME, se realiza una comparación por simulación entre 802.15.4 y 802.15.4e DSME luego de aplicar protocolos para el ahorro de energía. Los resultados se los puede observar en [35].

La mayor parte de las simulaciones encontradas han sido realizadas para comparar el 802.15.4e con el protocolo anterior o para compararlo al hacer ciertos cambios propuestos por los autores, estos cambios aumentan confiabilidad, eficiencia energética, retraso, etc. Debemos tomar en cuenta que otras plataformas como Waspote, Libelium y Techedge también se orientan al sector industrial, con sus respectivos kits de desarrollo y herramientas de simulación. Sin embargo, 802.15.4e sigue siendo más popular por su robustez.

## **3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **3.1 Conclusiones**

El protocolo 802.15.4e es una enmienda que supera en muchos aspectos a su antecesor, desde su aprobación en 2012 ha sido catalogado como un pilar en el desarrollo de IoT, motivo por el cual en el transcurso de los siguientes años ha sido objeto de análisis en especial de los diferentes modos de operación que le hacen acreedor a varias aplicaciones

en el ámbito industrial, en medicina, en robótica, identificación de objetos o personas, monitoreo, Smart utility, etc.

Entre los modos de operación de 802.15.4e destacan TSCH, DSME y LLDN por sus características, a comparación de 802.15.4 tienen una gran mejora en lo que respecta a entrega de información en el destino, pero al mismo tiempo se añade complejidad de procesamiento e implementación.

En el caso de TSCH, el mecanismo de asignación que controla los recursos de cada enlace también debe asignar nuevos flujos y todo esto sin cambiar todas las asignaciones de la red, es decir, la asignación debe ser robusta ante cambios inesperados para cumplir con la baja latencia y alta confiabilidad que se garantiza en este modo de operación. Para lograr el sincronismo que es fundamental se hace necesario el envío de tramas periódicas, podemos añadir que el procesamiento es más complejo y largo para el controlador, además, al utilizar ranuras de tiempo no hay periodos de sleep. Estas falencias contribuyen a que la duración de la batería disminuya considerablemente, pero se cumplirá con los requerimientos de las aplicaciones que trabajan con TSCH.

En el modo DSME el mecanismo de gestión es aún más complejo, pero se adecua a las necesidades de aplicaciones actuales, las asignaciones específicas de GTS se deben mantener incluso con el esquema de comunicación multisaltos y a la vez manteniendo los requisitos de QoS. El problema surge a no tener un control total de la ubicación de los nodos de la red, ya que en una red que tenga cambios constantes se puede presentar el caso en que no todos los coordinadores tengan cantidades similares de nodos asociados y como consecuencia los flujos de tráfico variarán causando latencias no determinísticas, una posible solución es dotar al mecanismo de asignación de procedimientos para que en estos casos se pueda descentralizar los flujos de tráfico.

Al igual que en el modo TSCH, en DSME no existen periodos sleep y la duración de la multisupertrama representa un mayor tiempo en que los nodos deben estar activos, a pesar de que con la reducción del CAP se permite a los nodos asociados entrar en sleep durante los DSME-GTSs que no les corresponde, debemos considerar que el PANC y los coordinadores permanecen más tiempos activos, esto causará a la larga reducción en la vida útil de la red pues los coordinadores controlan toda la red.

LLDN se apoya en una estructura de supertrama simple para brindar baja latencia determinística, esta trama es regulada por tramas beacon y al trabajar solo con topología tipo estrella se convierte en complemento perfecto para automatización en fábricas, pero trabaja solo con un canal que puede tener disminución en su calidad, algo que es muy

común en fábricas. Otra falencia es que no hay suficiente especificación ante casos de tráfico variante o cambios en la topología ya que antes de entrar en estado Online es obligatorio saber el tamaño de trama y el número de nodos.

El modo AMCA al no poseer la característica de sincronismo, causa que los nodos de la red estén permanentemente en escucha, por lo cual el consumo de energía es alto y la duración de la batería disminuye a menos que estén conectados a la red eléctrica. En cuanto a su gestión es más simple que los modos anteriores pues los coordinadores no controlan del todo las asignaciones, debido a que cada nodo escoge el mejor canal como canal asignado y para la transmisión de datos hacia otro nodo destino se cambia al canal del nodo destino. Esta capacidad que obtiene el nodo de escoger su canal asignado proporciona al modo AMCA la facilidad de adaptarse a redes de gran tamaño.

El objetivo del modo BLINK es lograr duración máxima de baterías, para lo cual trabaja con una trama multipropósito que es la más pequeña a diferencia de los modos anteriores, el hecho de que no exista asociación y el tamaño de la trama la hace perfecta para identificación de cosas o personas y al no estar completamente definidas en el estándar, están sujetas a cambios que se hagan dependiendo de la necesidad de las aplicaciones.

### **3.2 Recomendaciones**

En el modo TSCH se han presentado mejoras con el pasar de los años, se puede analizar estos nuevos modos TSCH que se adaptan de mejor manera a las necesidades de IoT, por ejemplo, tenemos un modelo avanzado en el que se puede estimar la latencia, el consumo de energía y el rendimiento de los nodos de mejor manera. Estas mejoras ya están implementadas en una herramienta gratuita llamada SmartMesh Power and Performance Estimator y sus mediciones experimentales han sido validadas con un producto comercial llamada SmartMesh IP.

Se recomienda analizar por separado el 6TiSCH que es la integración de los protocolos de capa superior con TSCH, ya que de esta forma 6TiSCH se encargaría de programar los intervalos tiempo, mantener el cronograma de comunicación, adaptación de los recursos en función del tráfico, etc.

De igual manera se han propuesto soluciones para mejorar el rendimiento de energía en DSME pues como se mencionó anteriormente en nodos con restricción de energía esto representa un gran problema para su mantenimiento. Por este motivo se recomienda analizar ELPIDA (Enhancements for LowPower Instrumentation DSME Applications) que

propone que los nodos luego de enviar sus tramas entren en sleep durante el CAP, esto se aplicaría a topologías cluster-tree.

Se recomienda también estudiar las mejoras de confiabilidad en LLDN que se lograrían a través de nodos de retransmisión, esta propuesta indica que el ahorro de energía en los nodos finales sería aproximadamente de un 33%. En esta propuesta los nodos de retransmisión son los responsables de hacer el reenvío en caso de que la trama no haya llegado a su destino. Como los nodos finales ya no tienen que recibir ACKs ni hacer retransmisiones, entonces se lograría el ahorro de energía.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Adams, «An Introduction to IEEE STD 802.15.4,» *Freescale Semiconductor, Inc*, vol. 2, nº 1055, pp. 1-8, 2005.
- [2] Hindawi Publishing Corporation, «Evaluating IEEE 802.15.4 for Cyber-Physical Systems,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 20, nº 596397, pp. 1-14, 2011.
- [3] A. Giuseppe, «IEEE 802.15.4e Standard A Building Block for the Internet of (Relevant) Things,» de *Smart Cities and Communities* , Missouri, 2016.
- [4] B. David, «IoT: TECNOLOGÍAS, usos, tendencias y desarrollo futuro.,» UNIVERSIDAD ABIERTA DE CATALUÑA, Barcelona, 2014.
- [5] H. Luis, «Análisis de desempeño del protocolo MAC multicanal del estándar IEEE 802.15.4,» Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2017.
- [6] guduruaishwarya09, «GEEKSFORGEES,» FOUNDER GEEKS FOR GEEKS, 9 ENERO 2021. [En línea]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-ieee-802-15-4-technology/>. [Último acceso: 27 NOVIEMBRE 2021].
- [7] V. ALCAZAR, «Estudio de las prestaciones de IEEE 802.15.4e,» UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA, BARCELONA, 2013.

- [8] S. SAN JOSE, «Implementación del Mecanismo de Acceso al Medio (MAC) IEEE 802.15.4e CSL (Coordinated Sampled Listening) sobre OpenWSN y Plataforma OpenMote,» UNIVERSIDAD ABIERTA DE CATALUÑA , BARCELONA, 2015.
- [9] F. CHENG, G. REINHARD y D. FALKO, «Towards IEEE 802.15.4e: A Study of Performance Aspects,» de *IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom)* , PISA, 2010.
- [10] R. FERNÁNDEZ, M. ALMEIDA y D. BRANDAO, «Performance Evaluation of Asynchronous Multi-channel MAC Protocol for WSN,» *Springer Science+Business Media*, vol. 7, nº 20, pp. 1-19, 2020.
- [11] D. GUGLIELMO, A. GIUSEPP y A. SEGHETTI, «From IEEE 802.15.4 to IEEE 802.15.4e: A Step,» *Springer International Publishing Switzerland* , vol. II, nº 10, pp. 1-19, 2014.
- [12] N. CHOUDHURY, R. MATAM, M. MUKHERJEE y J. LLORET, «A Performance-to-Cost Analysis of IEEE 802.15.4 MAC With 802.15.4e MAC Modes,» *IEEEACCESS*, vol. IV, nº 54, pp. 1-15, 2020.
- [13] D. GUGLIELMO, S. BRIENZA y G. ANASTASI, «IEEE 802.15.4e: A survey,» *ELSEVIER*, vol. III, nº 04, pp. 1-24, 2016.
- [14] IEEE Computer Society, «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS) Amendment 1: MAC sublayer,» de *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks*, NEY YORK, IEEE Std 802.15.4e™-2012., 2012, pp. 1-225.
- [15] H. KURUNATHAN, R. SEVERINO, A. KOUBAA y E. TOVAR, «IEEE 802.15.4e in a Nutshell: Survey and Performance Evaluation,» *JOURNAL OF LATEX CLASS FILES*, vol. 14, nº 8, pp. 1-22, 2015.
- [16] J. VERA, «ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE REDES INALÁMBRICA DE SENSORES DETERMINISTAS ROBUSTAS,» UNIVERSIDA POLITECNICA DE VALENCIA, VALENCIA, 2017.
- [17] J. WUN-CHEOL y L. JUNHEE, «Performance Evaluation of IEEE 802.15.4e DSME MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,» *Electronics and Telecommunications Research Institute, University of Science and Technology.*, vol. II, nº 12, pp. 1-6, 2012.
- [18] R. HERNÁNDEZ, METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN, MÉXICO : McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, 2014.
- [19] ZIG SERAFIN, «QUALTRICS.XM,» Qualtrics, 28 ENERO 2021. [En línea]. Available: <https://www.qualtrics.com/es/gestion-de-la-experiencia/investigacion/investigacion-cuantitativa/>. [Último acceso: 5 ENERO 2022].
- [20] J. Abreu, «El Método de la Investigación,» *International Journal of Good Conscience*, vol. 9, nº 1870-557, pp. 195-204, 2014.

- [21] F. Sánchez, «Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos,» *REVISTA DIGITAL DE INVESTIGACIÓN EN DOCENCIA UNIVERSITARIA*, vol. 13, nº 2223-2516, pp. 102 -122, 2019.
- [22] C. Bastis, «Online-Tesis,» Online-Tesis, 2 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://online-tesis.com/tecnicas-de-recoleccion-de-datos-para-realizar-un-trabajo-de-investigacion/>. [Último acceso: 2 Diciembre 2021].
- [23] E. Gomez, F. Navas, G. Aponte y L. Betancourt, «Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización,» *DYNA*, vol. 81, nº 184, pp. 158-163, 2014.
- [24] X. Vilajosana, P. Tuset, T. Watteyne y K. Pister, «OpenMote: Open-Source Prototyping Platform for the Industrial IoT,» *Open Mote*, vol. II, pp. 1-12, 2018.
- [25] A. Creixell, «Implementació de protocol TSCH al hardware OpenMote,» Universidad Oberta de Catalunya, Catalunya, 2015.
- [26] J. Lopez, «IMPLEMENTACION DE PROTOCOLO MQTT-S SOBRE IEEE 802.15.4E CON PLATAFORMAS OPENMOTE,» Universidad Abierta de Catalunya, Barcelona, 2018.
- [27] Contiki, «Contiki-NG,» Contiki, 8 Julio 2021. [En línea]. Available: [https://contiki-ng.readthedocs.io/en/master/\\_api/group\\_\\_openmote-cc2538.html](https://contiki-ng.readthedocs.io/en/master/_api/group__openmote-cc2538.html). [Último acceso: 20 Diciembre 2021].
- [28] M. Márquez, «Demostrador de Internet of things con la tecnología IEEE 802.15.4e utilizando el sistema operativo OpenWSN, OpenSim y The Things.IO,» Universidad Oberta de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [29] F. Mudarra, «Demostrador de Internet of Things con la tecnología IEEE 802.15.4e utilizando la plataforma OpenMote y el sistema operativo OpenWSN y the things.io,» Universidad Abierta de Catalunya, Barcelona, 2018.
- [30] L. Wang y A. Reinhardt, «A Simulative Study of Network Association Delays in IEEE 802.15.4e TSCH Networks,» *A Simulative Study of Network Association Delays*, vol. 17, nº 17, pp. 1-3, 2017.
- [31] I. Khoufi, P. Minet, E. Lilovant y B. Rmili, «Building an IEEE 802.15.4e TSCH network,» *Cedex*, vol. 12, nº París , pp. 1-2, 2016.
- [32] OMNeT++, «OMNeT++,» OMNeTpp, 2021. [En línea]. Available: <https://omnetpp.org/intro/>. [Último acceso: 24 Diciembre 2021].
- [33] P. Kumar, S. Ranjan y S. Lin Wu, «A Novel IEEE 802.15.4e DSME MAC for Wireless Sensor Networks,» *Sensors*, vol. 17, nº 7010168, pp. 1- 25, 2017.
- [34] OPNET, «OPNET Optimun Network Performance,» Optimun Network Performance, 17 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>. [Último acceso: 24 Diciembre 2021].

- [35] S. Capone, R. Brama, F. Ricciato, G. Boggia y A. Malvasi, «Modeling and simulation of energy efficient enhancements for IEEE 802.15.4e DSME,» de *2014 Wireless Telecommunications Symposium*, Washington, 2014.
- [36] C. Monje, «METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA Guía Didáctica,» de *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA*, NEIVA, Universidad Surcolombiana , 2011, p. 217.

# ANEXOS

ANEXO A. Conjunto de tablas de trama multipropósito del modo BLINK.

**Table 47—MCPS-DATA.confirm parameters**

Name	Type	Valid range	Description
status	Enumeration	SUCCESS, TRANSACTION_OVERFLOW, TRANSACTION_EXPIRED, CHANNEL_ACCESS_FAILURE, INVALID_ADDRESS, INVALID_GTS, NO_ACK, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY, INVALID_PARAMETER, ACK_RCVD_NODSN_NOSA	The status of the last MSDU transmission.
<u>NumBackoffs</u>	<u>Integer</u>	<u>0x00–0xff</u>	<u>The number of times the CSMA-CA algorithm was required to backoff as described in 5.1.1.4 while attempting the current transmission. If “Status” is anything other than “SUCCESS,” this value is undefined.</u>
<u>AckPayload</u>	<u>Set of octets</u>	<u>==</u>	<u>The set of octets received in the Acknowledgement payload by the MAC sublayer entity including payload IEs if present.</u>

**Table 48—MCPS-DATA.indication parameters**

Name	Type	Valid range	Description
SrcAddrMode	Enumeration	NO_ADDRESS, SIMPLE_ADDRESS, SHORT_ADDRESS, EXTENDED_ADDRESS	The source addressing mode for this primitive corresponding to the received MPDU.
SrcPANId	Integer	0x0000–0xffff	The PAN identifier of the entity from which the MSDU was received. <u>Valid only when a source PAN identifier is included in the received frame.</u>
DstAddrMode	Enumeration	NO_ADDRESS, SIMPLE_ADDRESS, SHORT_ADDRESS, EXTENDED_ADDRESS	The destination addressing mode for this primitive corresponding to the received MPDU.
DstPANId	Integer	0x0000–0xffff	The PAN identifier of the entity to which the MSDU is being transferred. <u>Set to the receiver's PAN ID if the PAN ID is not carried in the received frame.</u>
...			
msdu	Set of octets	—	The set of octets forming the MSDU being indicated by the MAC sublayer entity <u>including payload IEs if present.</u>
...			
DSN	Integer	0x00–0xff	The DSN of the received data frame <u>if one was present.</u>
...			

## **ORDEN DE EMPASTADO**